

Resumen

Este proyecto continua con el estudio iniciado en los proyectos: *Alimentación “Energy Harvesting” basada en fuentes piezoeléctricas*, *Alimentación autónoma: aplicación a fuente piezoeléctrica* y *Banco de pruebas para sistemas autoalimentados en aplicaciones viales*, que se realizaron anteriormente. Este estudio se basa en la búsqueda de soluciones de alimentación Energy Harvesting centrados en fuentes piezoeléctricas. El objetivo de este estudio es conocer las posibilidades que pueden ofrecer los materiales piezoeléctricos para alimentación autónoma cuando son excitados por vehículos en diferentes circunstancias y entornos viales. Para la realización de este estudio se han utilizado señales provenientes del banco de ensayos, así como señales obtenidas de una instalación construida en un vial del Campus.

Para poder realizar el estudio de los diversos materiales piezoeléctricos utilizados en este proyecto, se necesitan conocer las características de los modelos eléctricos. Para obtener estas características se ha diseñado un programa basado en LabView, este programa además puede modificar la señal para que simule las diversas circunstancias a las que pueden estar sometidos los diferentes materiales piezoeléctricos. En este estudio se ha tenido en cuenta la distancia de seguridad entre vehículos para diferentes velocidades y la posibilidad de poder amplificar la excitación que pueden recibir los diversos materiales. Utilizando el programa PSpice OrCAD® se realizan los diferentes modelos con el objetivo de observar el comportamiento de los materiales bajo diversas circunstancias. También se han utilizado varias topologías rectificadoras diferentes para poder comprobar en que situación se puede obtener la máxima tensión acumulada posible. Además también se ha evaluado la máxima potencia que puede entregar cada material en cada situación.

Por ultimo se han realizado varias pruebas prácticas con el banco de ensayos para comprobar la acumulación energética real que se puede obtener de los materiales instalados en él. También se ha realizado el estudio de una aplicación práctica que sea capaz de alimentar pequeños circuitos o sensores de poco consumo.

Abstract

This Project goes on with the study started in the projects *Feeding “Energy Harvesting” based on piezoelectric sources, independent feeding: application to piezoelectric source and testing bench to self fed systems in roads applications* that were previously done. This study is based on the search of feeding solutions Energy Harvesting focus on piezoelectric sources. The aim of this study is know the different piezoelectric materials possibilities that can offer to independent feeding when different circumstances and road surroundings are excited by vehicles in. To develop this study several signals of the testing bench have been used and also signals get from an installation constructed on a Campus road.

As far as the study of the different piezoelectric materials used in this project is concerned we should know the electrical models features. In order to obtain these characteristics a program based on LabView was designed, this program can modify the signal so that it simulates the diverse circumstances to which they can be put under the different piezoelectric materials. In this study I have bearded in mind the safe distance between vehicles for different speeds and the possibility of being able to amplify the excitation that can receive the diverse materials. Using the program PSpice OrCAD® the different models with the objective are made to observe the behaviour of the materials under diverse circumstances. Also several different rectifying topologies have been used to be able to verify the maximum overvoltage accumulated. In addition I have assessed the maximum power that can give each material in each situation.

Last but not least different practical proofs with the testing bench have been done to check the actual energy accumulation that can be obtained from the materials installed on it. Also the study of a practical application has been made that is able to feed small circuits or low consumption sensor.



E.U.I.T. TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE CARRERA PLAN 2000

TEMA: Sistemas de Alimentación e Interfaces de Potencia
TÍTULO: Modelado de materiales piezoeléctricos para aplicaciones de autoalimentación en entornos viales
AUTOR: Borja María Boal
TUTOR: Manuel Vázquez Rodríguez V^o B^o.
DEPARTAMENTO: Sistemas Electrónicos y de Control

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE: Ana Belén García Hernando
VOCAL: Manuel Vázquez Rodríguez
VOCAL SECRETARIO: Francisco Javier Jiménez Martínez
DIRECTOR:

Fecha de lectura:

Calificación: El Secretario,

RESUMEN DEL PROYECTO:

El presente proyecto fin de carrera, continua con la línea iniciada con los proyectos: Alimentación “Energy Harvesting” basada en fuentes piezoeléctricas, Alimentación autónoma: aplicación a fuente piezoeléctrica y Banco de pruebas para sistemas autoalimentados en aplicaciones viales, que se realizaron anteriormente.

Inicialmente se han perfeccionado el modelado obtenido a partir de las señales adquiridas mediante el banco de pruebas utilizando las herramientas de análisis Pspice y software basado en LabView. Partiendo de las respuestas obtenidas mediante el banco de ensayos, se ha realizado un estudio para la obtención del máximo rendimiento de fuentes piezoeléctricas, diseñadas para aplicaciones viales.

En esta línea, se diseño un prototipo práctico para la obtención y acumulación de energía eléctrica basada en fuentes piezoeléctricas.

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



Modelado de materiales piezoeléctricos para aplicaciones de autoalimentación en entornos viales

Borja María Boal

Septiembre 2012

Agradecimientos

Podría nombrar a muchas personas a las que tengo que dar las gracias por estar hoy aquí.

En primer lugar tengo que dar las gracias a Manuel por darme la oportunidad de realizar este proyecto y por prestarme ayuda durante la realización del mismo.

Tengo que agradecer a mis padres, mi hermana y al resto de mi familia que me apoyasen en la idea de estudiar esta carrera ya que sin su apoyo (tanto moral como económico) no me habría sido posible llegar hasta aquí.

Otras personas imprescindibles en estos años han sido “mis amigos de la uni” que desde el primer año han sido responsables de todos los buenos momentos que he pasado en la universidad.

Por último quiero agradecer a mis amigos de toda la vida por apoyarme y estar ahí cuando lo he necesitado.

Muchas gracias a todos.

“Muchas veces lo importante de haber recorrido un camino no es la meta sino con quien lo hayas realizado.”

Denis Diderot (1713-1784) Filósofo y escritor francés.

CONTENIDO

Introducción.....	25
Planteamiento del proyecto.....	27
Objetivos del proyecto	27
Estructura del libro.....	28
 Capítulo 1: Introducción al Energy Harvesting	29
1.1 Definición de Energy Harvesting	31
1.2 Energy Harvesting basado en fuente piezoeléctrica	38
1.2.1 Aplicaciones basadas en materiales piezoeléctricos	40
1.3 Fabricantes interesados en esta tecnología	41
1.4 Materiales utilizados en el proyecto	46
1.4.2 Cable piezoeléctrico	46
1.4.2 Encendedor comercial	48
 Capítulo 2: Mejora de los modelos eléctricos.....	49
2.1 Tipos de señales y Banco de ensayo	51
2.2 Metodología para la obtención de modelos eléctricos equivalentes de la que partimos	53
2.3 Problemas detectados en la metodología para la obtención de modelos eléctricos.....	69
2.4 Distancia de seguridad	72
2.5 Metodología mejorada para la obtención de modelos eléctricos	74
2.6 Modelo equivalente para N piezoeléctricos	93
2.7 Comparación de las Metodologías.....	97

Capítulo 3: Estudio sobre acumulación energética 99

3.1 Estudio de asociaciones paralelo	101
3.2 Estudio del comportamiento de los materiales piezoeléctricos con etapa rectificadora con puente de diodos	103
3.2.1 Curva de regulación y potencia de un cable.	103
3.2.2 Curva de regulación y potencia de 80 cables asociados en paralelo.	114
3.2.3 Curva de regulación y potencia de 2 bloques en serie de 80 cables asociados en paralelo.	125
3.2.4 Comparación de resultados.....	133
3.3 Estudio del comportamiento de los materiales piezoeléctricos con etapa rectificadora formada por dos diodos.	136
3.3.1 Curva de regulación y potencia de un piezoeléctrico.	136
3.3.2 Curva de regulación y potencia de 80 cables asociados en paralelo.	145
3.3.3 Comparación de resultados.....	152
3.4 Estudio del comportamiento de los materiales piezoeléctricos con amplificación.	154
3.4.1 Curvas de regulación y potencia amplificadas.	154
3.4.2 Comparación de resultados.....	167
3.5 Estudio del efecto de la distancia de seguridad en aplicaciones viales de los materiales piezoeléctricos.	169
3.5.1 Curvas de regulación y potencia con distancia de seguridad.	169
3.5.2 Comparación de resultados.....	186

Capítulo 4: Aplicación práctica utilizando una cerámica piezoeléctrica..... 189

4.1 Caracterización de un encendedor comercial basado en cerámica piezoeléctrica.	191
4.2 Pruebas prácticas	194
4.3 Aplicación práctica.....	200

Conclusiones	207
---------------------------	------------

Bibliografía	211
---------------------------	------------

Documentación online	213
----------------------------	-----

Anexo	215
--------------------	------------

Contribuciones de Fourier.	217
---------------------------------	-----

Ilustraciones

Figura 1: Modelo cosechador de Max Donelan	33
Figura 2: Sistema de metabolismo arbóreo	36
Figura 3: Circuito de aplicación que utiliza el integrado LTC3588 de Linear Technology©....	44
Figura 4: Estructura interna de los cables piezoeléctricos.....	46
Figura 5: Generador Thevenin y generador Norton del cable piezoeléctrico	47
Figura 6: Encendedor comercial abierto.	48
Figura 7: Ejemplo de archivos procedentes del osciloscopio para su posterior modelado	54
Figura 8: Paso de los datos desde Excel a un fichero de texto para su posterior utilización	55
Figura 9: Generador VPWL_RE_FOREVER encargado de recrear la señal original	56
Figura 10: Señal recreada por el generador VPWL_RE_FOREVER	57
Figura 11: Condiciones de simulación necesarias para obtener los coeficientes de Fourier.....	58
Figura 12: Proceso de creación de un bloque jerárquico.....	60
Figura 13: Esquema interno del bloque jerárquico formado por 75 generadores sinusoidales..	61
Figura 14: Parámetros del generador V_{SIN}	61
Figura 15: Proceso de edición de las propiedades de los 75 generadores	62
Figura 16: Señal original procedente del banco de ensayos (verde)	63
Figura 17: Señal original procedente del banco de ensayos (verde)	63
Figura 18: Transformada de Fourier para la señal original (verde).....	64
Figura 19: Divisor de tensión utilizado para conseguir el modelo eléctrico equivalente.....	65
Figura 20: Esquema interno del bloque jerárquico formado por 75 generadores sinusoidales y el condensador de 3nF	67
Figura 21: Comparación señales original (verde) y el modelo equivalente eléctrico (roja) superpuestas	68
Figura 22: Transformada de Fourier para la señal original (verde) y para el modelo eléctrico equivalente (roja)	68
Figura 23: Extract Multiple Tone Information VI.....	69

Figura 24: Menú Spectral Measurements.....	70
Figura 25: Panel de control aplicación obtener modelo.	76
Figura 26: Opciones para elegir ficheros en el panel de control	77
Figura 27: Opciones para elegir el modo de calculo en el panel de control.....	78
Figura 28: Menú del panel de control.....	79
Figura 29: Datos mostrado en el panel de control.....	79
Figura 30: Gráficos del panel de control.	80
Figura 31: Lectura fichero CSV	82
Figura 32: Lectura fichero TXT	82
Figura 33: Cálculo del periodo de muestreo.....	83
Figura 34: Calculo de las muestras que hay que añadir.	84
Figura 35: Creación de la señal	85
Figura 36: Calculo del número de armónicos por error. Case TRUE	86
Figura 37: calculo del número de armónicos por filtrado. Case False	87
Figura 38: calculo de armónicos definitivo y filtrado por frecuencia.	88
Figura 39: Creación de los nombres de los archivos.....	88
Figura 40: Guardar datos medidos.	89
Figura 41: Cálculo de los parámetros del modelo equivalente.....	91
Figura 42: Muestra de las señales, sus espectros y error definitivo	92
Figura 43: (a) Planta de la plataforma giratoria del banco de ensayos. (b) Ensayo en realización	93
Figura 44: Directorio correspondiente a la asociación paralelo de ochenta cables	96
Figura 45: Resultados para asociación en paralelo hasta 480 cables.	102
Figura 46: Valor máximo de tensión continua en el condensador para asociación paralelo hasta 880 cables.....	102
Figura 47: Circuito para obtener los valores de tensión final.....	104
Figura 48: Curva de regulación cable piezoeléctrico con amplificación mecánica	105
Figura 49: Curva de potencia cable piezoeléctrico con amplificación mecánica.....	105
Figura 50: Curva de regulación cable piezoeléctrico sin amplificación mecánica.....	107

Figura 51: Curva de potencia cable piezoeléctrico sin amplificación mecánica.....	108
Figura 52: Curva de regulación cable piezoeléctrico en el exterior al aire.	109
Figura 53: Curva de potencia cable piezoeléctrico en el exterior al aire.....	109
Figura 54: Curva de regulación cable piezoeléctrico en el exterior enterrado.	110
Figura 55: Curva de potencia cable piezoeléctrico en el exterior enterrado.	111
Figura 56: Circuito para obtener los valores de tensión final del encendedor.	111
Figura 57: Curva de regulación de un encendedor comercial.	112
Figura 58: Curva de potencia del encendedor comercial.	113
Figura 59: Curva de regulación 80 cables piezoeléctrico con amplificación mecánica en paralelo con TD.....	115
Figura 60: Curva de regulación 80 cables piezoeléctrico con amplificación mecánica en paralelo sin TD.....	115
Figura 61: Curva de potencia de 80 cables piezoeléctricos con amplificación mecánica en paralelo con TD.....	115
Figura 62: Curva de potencia de 80 cables piezoeléctricos con amplificación mecánica en paralelo sin TD.....	116
Figura 63: Curva de regulación 80 cables piezoeléctrico sin amplificación mecánica en paralelo con TD.....	117
Figura 64: Curva de regulación 80 cables piezoeléctrico sin amplificación mecánica en paralelo sin TD.....	117
Figura 65: Curva de potencia de 80 cables piezoeléctricos sin amplificación mecánica en paralelo con TD.....	117
Figura 66: Curva de potencia de 80 cables piezoeléctricos sin amplificación mecánica en paralelo sin TD.....	118
Figura 67: Curva de regulación 80 cables piezoeléctrico en paralelo en el exterior al aire con TD.	119
Figura 68: Curva de regulación 80 cables piezoeléctrico en paralelo en el exterior al aire sin TD.	119
Figura 69: Curva de potencia de 80 cables piezoeléctricos en paralelo en el exterior al aire con TD.	119
Figura 70: Curva de potencia de 80 cables piezoeléctricos en paralelo en el exterior al aire sin TD.	120

Figura 71: Curva de regulación 80 cables piezoeléctrico en paralelo en el exterior enterrado con TD.	121
Figura 72: Curva de regulación 80 cables piezoeléctrico en paralelo en el exterior enterrado sin TD.	121
Figura 73: Curva de potencia de 80 cables piezoeléctricos en paralelo en el exterior enterrado con TD.	121
Figura 74: Curva de potencia de 80 cables piezoeléctricos en paralelo en el exterior enterrado sin TD.	122
Figura 75: Curva de regulación 80 encendedores en paralelo con TD.....	123
Figura 76: Curva de regulación 80 encendedores en paralelo con TD.....	123
Figura 77: Curva de potencia de 80 encendedores comerciales con TD.....	124
Figura 78: Curva de potencia de 80 encendedores comerciales sin TD.....	124
Figura 79: Curva de regulación de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo con amplificación mecánica.....	126
Figura 80: Curva de potencia de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo con amplificación mecánica.....	126
Figura 81: Curva de regulación de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo sin amplificación mecánica.....	127
Figura 82: Curva de potencia de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo sin amplificación mecánica.....	128
Figura 83: Curva de regulación de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo en el exterior al aire.....	129
Figura 84: Curva de potencia de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo en el exterior al aire.....	129
Figura 85: Curva de regulación de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo en el exterior enterrado.....	130
Figura 86: Curva de regulación de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo en el exterior enterrado.....	131
Figura 87: Curva de regulación de dos bloques en serie de 80 encendedores en paralelo.....	132
Figura 88: Curva de potencia de dos bloques en serie de 80 encendedores en paralelo.	132
Figura 89: Circuito para obtener los valores de tensión final dos diodos.....	136
Figura 90: Curva de regulación cable piezoeléctrico con amplificación mecánica etapa rectificadora dos diodos	137

Figura 91: Curva de potencia cable piezoeléctrico con amplificación mecánica etapa rectificadora dos diodos	138
Figura 92: Curva de regulación cable piezoeléctrico sin amplificación mecánica etapa rectificadora dos diodos	139
Figura 93: Curva de potencia cable piezoeléctrico sin amplificación mecánica etapa rectificadora dos diodos	139
Figura 94: Curva de regulación cable piezoeléctrico en el exterior al aire etapa rectificadora dos diodos	140
Figura 95: Curva de potencia cable piezoeléctrico en el exterior al aire etapa rectificadora dos diodos	141
Figura 96: Curva de regulación cable piezoeléctrico en el exterior enterrado etapa rectificadora dos diodos.	141
Figura 97: Curva de potencia cable piezoeléctrico en el exterior enterrado etapa rectificadora dos diodos.	142
Figura 98: Circuito para obtener los valores de tensión final del encendedor con etapa rectificadora de dos diodos.	142
Figura 99: Curva de regulación encendedor comercial etapa rectificadora dos diodos.	143
Figura 100: Curva de potencia encendedor comercial etapa rectificadora dos diodos.	144
Figura 101: Curva de regulación 80 cables piezoeléctricos con amplificación mecánica en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos.....	146
Figura 102: Curva de potencia 80 cables piezoeléctricos con amplificación mecánica en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos.....	146
Figura 103: Curva de regulación 80 cables piezoeléctricos sin amplificación mecánica en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos.....	147
Figura 104: Curva de potencia 80 cables piezoeléctricos sin amplificación mecánica en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos.....	147
Figura 105: Curva de regulación 80 cables piezoeléctricos en el exterior al aire en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos.	148
Figura 106: Curva de potencia 80 cables piezoeléctricos en el exterior al aire en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos.....	148
Figura 107: Curva de regulación 80 cables piezoeléctricos en el exterior enterrado en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos.	149
Figura 108: Curva de potencia 80 cables piezoeléctricos en el exterior enterrado en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos.	150

Figura 109: Curva de regulación 80 encendedores comerciales en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos.	150
Figura 110: Curva de Potencia 80 encendedores comerciales en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos	151
Figura 111: Circuito para la obtención de los valores para el modelo cable con amplificación x1000.....	155
Figura 112: Curvas de regulación cable piezoeléctrico con amplificación mecánica amplificado 10, 100 y 1000 veces.....	156
Figura 113: Curvas de potencia cable piezoeléctrico con amplificación mecánica amplificado 10, 100 y 1000 veces.....	157
Figura 114: Curvas de regulación cable piezoeléctrico sin amplificación mecánica amplificado 10, 100 y 1000 veces.....	158
Figura 115: Curvas de potencia cable piezoeléctrico con amplificación mecánica amplificado 10, 100 y 1000 veces.....	159
Figura 116: Curva de regulación cable piezoeléctrico en exterior al aire amplificado 10 veces.....	160
Figura 117: Curvas de regulación cable piezoeléctrico en exterior al aire amplificado 100 y 1000 veces.....	161
Figura 118: Curva de potencia cable piezoeléctrico en exterior al aire amplificado 10 veces.....	161
Figura 119: Curvas de potencia cable piezoeléctrico en exterior al aire amplificado 100 y 1000 veces.....	162
Figura 120: curvas de regulación cable piezoeléctrico en exterior al aire amplificado 10, 100 y 1000 veces.....	163
Figura 121: curvas de potencia cable piezoeléctrico en exterior enterrado amplificado 10, 100 y 1000 veces.....	164
Figura 122: Opciones de simulación.....	165
Figura 123: curva de regulación del encendedor comercial amplificado por 10.....	166
Figura 124: curva de potencia del encendedor comercial amplificado por 10.....	166
Figura 125: Señal original cable amplificado mecánicamente.....	170
Figura 126: Señal modificada para 50km/h.....	170
Figura 127: Curva de regulación cable piezoeléctrico con amplificación mecánica velocidad 50km/h.....	171
Figura 128: Curvas de regulación cable piezoeléctrico con amplificación mecánica velocidad 70km/h, 90km/h y 120km/h.	172

Figura 129: Curvas de potencia cable piezoeléctrico con amplificación mecánica velocidad 50 km/h, 70km/h, 90km/h y 120km/h.....	173
Figura 130: Curvas de regulación cable piezoeléctrico sin amplificación mecánica velocidad 50km/h 70km/h, 90km/h y 120km/h.....	175
Figura 131: curvas de potencia cable piezoeléctrico sin amplificación mecánica velocidad 50 km/h, 70km/h, 90km/h y 120km/h.....	176
Figura 132: Curvas de regulación cable piezoeléctrico exterior al aire velocidad 50km/h 70km/h, 90km/h y 120km/h.	178
Figura 133: Curvas de potencia cable piezoeléctrico exterior al aire velocidad 50 km/h, 70km/h, 90km/h y 120km/h.	179
Figura 134: Curvas de regulación cable piezoeléctrico exterior enterrado velocidad 50km/h 70km/h, 90km/h y 120km/h.	181
Figura 135: Curvas de potencia cable piezoeléctrico exterior enterrado velocidad 50 km/h, 70km/h, 90km/h y 120km/h.	182
Figura 136: Curvas de regulación encendedor comercial velocidad 50km/h 70km/h, 90km/h y 120km/h.	184
Figura 137: Curvas de potencia encendedor comercial velocidad 50km/h 70km/h, 90km/h y 120km/h.	185
Figura 138: Circuito para obtener la señal encendedor.....	191
Figura 139: Circuito para la caracterizar del encendedor.....	192
Figura 140: Curva de regulación encendedor comercial.....	192
Figura 141: Curva de potencia encendedor comercial.	193
Figura 142: Señal obtenida de dos encendedores recién instalados.....	194
Figura 143: Señal obtenida de dos encendedores después de varios ensayos.....	195
Figura 144: Circuito con dos encendedores.	195
Figura 145: Circuito tres encendedores con puente de diodos.....	197
Figura 146: Circuito tres encendedores con dos diodos cada uno.....	198
Figura 147: Circuito tres encendedores con dos diodos para los tres.....	199
Figura 148: Circuito para alimentar un sensor o circuito.....	200
Figura 149: Parte del circuito hasta el comparador.....	204
Figura 150: grafica de la tensión del zener y la salida del convertidor.	205

Tablas

Tabla 1: Comparativa de microcontroladores de Texas Instruments© relacionados con Energy Harvesting	41
Tabla 2: Comparativa de drivers RF de Texas Instruments© relacionados con Energy Harvesting	42
Tabla 3: Comparativa de convertidores DC/DC Texas Instruments© relacionados con Energy Harvesting	42
Tabla 4: Comparativa de reguladores lineales de Texas Instruments© relacionados con Energy Harvesting	43
Tabla 5: Comparativa de convertidores DC/DC de Linear Technology© relacionados con Energy Harvesting	44
Tabla 6: Comparativa de circuitos integrados orientados a material piezoeléctrico de Linear Technology©.....	45
Tabla 7: Características típicas de cable piezoeléctrico comercial.....	47
Tabla 8: Parámetros obtenidos en el fichero output generado por el programa OrCAD® PSpice59	
Tabla 9: Parámetros utilizados para la creación del modelo eléctrico equivalente	67
Tabla 10: Valores del coeficiente longitudinal.....	72
Tabla 11: Valores distancia de seguridad.....	73
Tabla 12: Valores del tiempo de seguridad en función de la velocidad.....	73
Tabla 13: Comparación resultados obtenidos y medidos	97
Tabla 14: Comparación resultados obtenidos y medido reales.	98
Tabla 15: Comparación del número de armónicos.....	98
Tabla 16: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable con amplificación mecánica.....	104
Tabla 17: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable sin amplificación mecánica.....	107
Tabla 18: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable en el exterior al aire.....	108
Tabla 19: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable en el exterior enterrado.....	110

Tabla 20: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un encendedor comercial.....	112
Tabla 21: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 cables con amplificación mecánica.	114
Tabla 22: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 cables sin amplificación mecánica.	116
Tabla 23: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 cables en el exterior al aire.	118
Tabla 24: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 cables en el exterior enterrado.....	120
Tabla 25: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 encendedores comerciales.	122
Tabla 26: Comparación de los valores con Td y sin Td.....	124
Tabla 27: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo con amplificación mecánica.....	125
Tabla 28: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo sin amplificación mecánica.....	127
Tabla 29: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo en el exterior al aire.....	128
Tabla 30: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo en el exterior enterrado.	130
Tabla 31: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de dos bloques en serie de 80 encendedores en paralelo.....	131
Tabla 32: Comparación resultados del modelo de cable con amplificación mecánica.	133
Tabla 33: Comparación resultados del modelo de cable sin amplificación mecánica.	133
Tabla 34: Comparación resultados del modelo de cable en el exterior al aire.....	133
Tabla 35: Comparación resultados del modelo de cable en el exterior enterrado.....	133
Tabla 36: Comparación resultados del modelo del encendedor comercial.	134
Tabla 37: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable con amplificación mecánica con etapa rectificadora de dos diodos.....	137

Tabla 38: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable sin amplificación mecánica con etapa rectificadora de dos diodos.	138
Tabla 39: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable en el exterior al aire con etapa rectificadora de dos diodos.	140
Tabla 40: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable en el exterior enterrado con etapa rectificadora de dos diodos.	141
Tabla 41: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de encendedor comercial con etapa rectificadora de dos diodos.	143
Tabla 42: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 cables con amplificación mecánica con etapa rectificadora de 2 diodos.	145
Tabla 43: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 cables sin amplificación mecánica con etapa rectificadora de 2 diodos.	146
Tabla 44: valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 cables en el exterior al aire con etapa rectificadora de 2 diodos.	147
Tabla 45: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 cables en el exterior enterrado con etapa rectificadora de 2 diodos.	149
Tabla 46: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 encendedores comerciales con etapa rectificadora de dos diodos.	150
Tabla 47: comparación de los resultados de todos los modelos con etapa rectificadora de dos diodos.	152
Tabla 48: Comparación de los resultados de todos los modelos con las dos etapas rectificadoras.	153
Tabla 49: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable con amplificación mecánica amplificado 10 100 y 1000 veces.	155
Tabla 50: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable sin amplificación mecánica amplificado 10 100 y 1000 veces.	157
Tabla 51: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable exterior al aire amplificado 10 100 y 1000 veces.	160

Tabla 52: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable exterior enterrado amplificado 10, 100 y 1000 veces.	162
Tabla 53: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un encendedor comercial amplificado por 10.	165
Tabla 54: comparación resultados del modelo de cable con amplificación mecánica.	167
Tabla 55: comparación resultados del modelo de cable sin amplificación mecánica.	167
Tabla 56: comparación resultados del modelo de cable en el exterior al aire.	167
Tabla 57: comparación resultados del modelo de cable en el exterior enterrado.	167
Tabla 58: comparación resultados del modelo de un encendedor comercial.	167
Tabla 59: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable con amplificación mecánica con distancia de seguridad..	171
Tabla 60: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable sin amplificación mecánica con distancia de seguridad...	174
Tabla 61: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable en el exterior al aire con distancia de seguridad.	177
Tabla 62: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable en el exterior enterrado mecánica con distancia de seguridad.	180
Tabla 63: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un encendedor comercial con distancia de seguridad.....	183
Tabla 64: Comparación resultados del modelo de cable con amplificación mecánica.	186
Tabla 65: Comparación resultados del modelo de cable sin amplificación mecánica.	186
Tabla 66: Comparación resultados del modelo de cable exterior al aire.....	186
Tabla 67: Comparación resultados del modelo de cable exterior enterrado.	187
Tabla 68: Comparación resultados del modelo encendedor comercial.	187
Tabla 69: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un encendedor comercial nuevo.	192
Tabla 70: Resultados de la primera prueba practica.....	196
Tabla 71: Resultados de la segunda prueba practica.	197
Tabla 72: Resultados de la tercera prueba practica.	199
Tabla 73: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente del cable piezoeléctrico del banco de ensayos con amplificación mecánica.	217

Tabla 74: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente del cable piezoeléctrico del banco de ensayos con amplificación mecánica amplificada por 10.	219
Tabla 75: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente del cable piezoeléctrico del banco de ensayos con amplificación mecánica distancia de seguridad 120km/h.	221
Tabla 76: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente del cable piezoeléctrico del banco de ensayos sin amplificación mecánica	231
Tabla 77: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente del cable piezoeléctrico del banco de ensayos sin amplificación mecánica amplificada por 100.	233
Tabla 78: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente del cable piezoeléctrico del banco de ensayos sin amplificación mecánica distancia de seguridad 90km/h.	235
Tabla 79: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente de los cables sin enterrar colocados en el vial del campus.	245
Tabla 80: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente de los cables sin enterrar colocados en el vial del campus amplificada por 1000.	248
Tabla 81: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente de los cables sin enterrar colocados en el vial del campus distancia de seguridad 70km/h.	251
Tabla 82: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente de los cables enterrados en el vial del campus.	257
Tabla 83: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente de los cables enterrados en el vial del campus amplificada por 10.	259
Tabla 84: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente de los cables enterrados en el vial del campus distancia de seguridad 50km/h.	261
Tabla 85: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente del encendedor comercial.	269
Tabla 86: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente del encendedor comercial amplificada por 10.	273
Tabla 87: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente del encendedor comercial utilizado en los circuitos prácticos.	277

Introducción

Planteamiento del proyecto

Se pretende continuar con la línea iniciada con los proyectos: Alimentación “Energy Harvesting” basada en fuentes piezoeléctricas, Alimentación autónoma: aplicación a fuente piezoeléctrica y Banco de pruebas para sistemas autoalimentados en aplicaciones viales, que se realizaron anteriormente.

Inicialmente se perfeccionará el modelado obtenido a partir de las señales adquiridas mediante el banco de pruebas utilizando las herramientas de análisis PSpice, Matlab, y/o software basado en LabView. Partiendo de las respuestas obtenidas mediante el banco de ensayos, se pretende realizar un estudio para la obtención del máximo rendimiento de fuentes piezoeléctricas, diseñadas para aplicaciones viales.

En esta línea, se pretende realizar el diseño de algún prototipo práctico para la obtención y acumulación de energía eléctrica basada en fuentes de origen piezoeléctrico.

Objetivos del proyecto

Este proyecto tiene varios objetivos principales, el primero de ellos es la mejora en la obtención de los modelos eléctricos, que permita una reproducción más exacta de las señales obtenidas en la realidad. El segundo objetivo de este proyecto, es la continuación del estudio realizado anteriormente, teniendo en cuenta las circunstancias reales que se pueden encontrar en las carreteras. El último objetivo de este proyecto se trata en la realización de un prototipo que sea capaz de alimentar pequeños sensores o circuitos de pequeños consumo.

Estructura del libro

El libro consta de varios capítulos. El primero se centra en la descripción de la tecnología basada en Energy Harvesting y en las formas en las que puede aparecer, la situación en la que se encuentra el mercado y los materiales utilizados para la realización de este proyecto.

El segundo capítulo se basa en la manera de obtener los modelos eléctricos de las señales capturadas del banco de ensayos o del exterior. Este capítulo se puede dividir en dos partes, en la primera se explica la creación del modelo del que partíamos y en la segunda parte la nueva metodología para obtener los modelos eléctricos, donde además de obtener los modelos de las señales capturadas, se pueden modificar éstas, para obtener señales que se obtendrían sometiendo los materiales a diversas circunstancias.

El siguiente capítulo, esta centrado en el estudio del comportamiento de los cables piezoeléctricos y de un encendedor piezoeléctrico comercial a la hora de acumular energía bajo diferentes condiciones físicas y asociaciones. En este proceso, se ha estudiado el comportamiento con diferentes topologías rectificadoras. Además de las diferentes topologías, se ha estudiado el efecto de amplificar la señal obtenida y la distancia de seguridad a respetar en carretera para diferentes velocidades.

En el cuarto y último capítulo, se han realizado algunas pruebas prácticas con encendedores comerciales para comprobar la tensión que se puede acumular y el correcto funcionamiento de los modelos creados con respecto a la realidad. La segunda parte del capítulo, esta dedicada al diseño de un circuito, que sea capaz de alimentar pequeños sensores o circuitos a partir de la energía obtenida de los encendedores instalados en el banco de ensayos.

Capítulo 1

Introducción al Energy Harvesting

1.1 Definición de Energy Harvesting

El consumo de energía es uno de los grandes medidores del progreso y bienestar de una sociedad. El concepto de "crisis energética" aparece cuando las fuentes de energía de las que se abastece la sociedad se agotan. Un modelo económico como el actual, cuyo funcionamiento depende de un continuo crecimiento, exige también una demanda igualmente creciente de energía. Puesto que las fuentes de energía fósil son limitadas, y en plena discusión sobre el retroceso de la presencia de la energía nuclear, es inevitable que en un determinado momento la demanda no pueda ser abastecida y todo el sistema colapse, salvo que se descubran y desarrollen otros nuevos métodos para obtener energía, éstas son conocidas como energías alternativas.

Por todos son conocidos las energías eólica, solar, hidráulica, mareomotriz, geotérmica, biomasa, etcétera; estas formas de energías alternativas ayudan a evitar el uso de combustibles fósiles, disminuyendo así la cantidad de gases que colaboran con el efecto invernadero al producir CO₂ en su combustión.

El inconveniente de éstas, es que son muy costosas debido entre otros a que necesitan infraestructuras muy grandes, y la energía que se obtiene es útil para alimentar dispositivos grandes, e incluso pequeños núcleos urbanos. Sin embargo, el Energy Harvesting es un método de recogida de energía, presente en el ambiente en menor cantidad, para transformarla en energía eléctrica, almacenarla, y alimentar dispositivos portátiles o redes de sensores.

Existen diferentes tipos de *Energy Harvesting*, dependiendo de la situación en la que nos encontremos, del entorno ó de las necesidades de la aplicación. Además, cada tipo de Harvesting genera diferentes cantidades de energía, por lo que se pueden diferenciar distintos tipos:

- Radiación ambiental. Consiste en cosechar la energía proveniente de los transmisores de ondas de radio que encontramos allí donde miramos. Antiguamente, era necesario estar muy próximo a un dispositivo inalámbrico radiante, o utilizar una gran superficie para poder obtener cantidades de potencia útiles. Las nantennas (nanoantenna) es una proposición, que sobrepasaría esta limitación haciendo uso de la abundante radiación natural, como la solar. Las nantennas son antenas cuyo tamaño es proporcional a la longitud de onda de la energía fotónica que el sol emite.

Están diseñadas para absorber longitudes de onda entre 0,4 y 1,4 μ m ya que en estas longitudes de onda hay mayor energía que en los infrarrojos y son el 85% de las emisiones solares.

Otra posibilidad, es emitir deliberadamente energía de radiofrecuencia de banda ancha para alimentar dispositivos remotos. Nikola Tesla, hace más de cien años ya intentó transmitir energía de baja frecuencia a larga distancia. Esto es algo muy común en sistemas pasivos de identificación con radio frecuencia (RFID), pero la seguridad y la Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos (y otras organizaciones equivalentes en todo el mundo) limitan la máxima potencia que puede ser emitida de esta forma.

- Energía Biomecánica: El cuerpo humano es una gran fuente de energía. Una persona de tamaño medio tiene almacenada en su grasa tanta energía como una pila de 1000Kg. Esta energía química se convierte en trabajo mediante la acción de nuestros músculos, con una eficiencia máxima del 25%. Muchos generadores hacen uso de ésta capacidad mediante la acción de manivelas que accionan una dinamo, por ejemplo; pero éste requiere una atención constante que nos distrae de nuestras tareas cotidianas. La meta es conseguir recolectar esta energía de las acciones que realizamos diariamente sin necesidad de que nosotros prestemos atención.

Un modelo actual, es el cosechador de Max Donelan², que se ata en torno a la rodilla. Se han centrado en la rodilla porque es la parte del cuerpo que más trabajo negativo realiza. El cosechador comprime un soporte para la rodilla configurado de tal forma que mueve un tren de engranajes, transmitiendo el movimiento a un motor DC sin escobillas que actúa como generador. Además, se incluye un embrague que permite que solo se recolecte energía en una dirección, lo que se ha demostrado que tiene mayor eficiencia. Mediante un potenciómetro se regula el ángulo de la rodilla para desconectar el sistema en determinados momentos y ayudando a la frenada.

1200°C o más, permitiendo el cosechado de energía de fuentes de alta temperatura y, por tanto, aumentando la eficiencia termodinámica.

- Energía Termoeléctrica: En 1821, Thomas Johann Seebeck descubrió que un gradiente térmico formado entre dos superficies conductoras distintas produce una diferencia de potencial. El corazón del efecto termoeléctrico se basa en el hecho de que un gradiente de temperatura en un material conductor resulta en un flujo de calor; de esto se deduce que los portadores de carga se redistribuyen. El flujo de portadores de carga entre las regiones frías y calientes crea la diferencia de potencial. Este tipo de uniones se denominan termopares.

En 1834, Jean Charles Athanase Peltier descubrió que una corriente eléctrica a través de la unión de dos conductores diferentes puede, dependiendo de la dirección de la corriente, causar que actúe como calentador o refrigerador. El calor absorbido o producido es proporcional a la corriente, y la constante de proporcionalidad es conocida como coeficiente de Peltier. Hoy en día, debido al conocimiento de los efectos de Seebeck y Peltier, que relacionan temperatura, tensión y corriente, los materiales termoeléctricos pueden ser usados como calentadores, refrigeradores y generadores. (TEGs).

Los materiales termoeléctricos ideales tienen un coeficiente de Seebeck muy alto, alta conductividad eléctrica y baja conductividad térmica. La baja conductividad térmica es necesaria para mantener un alto gradiente térmico en la unión. Los módulos termoeléctricos más comunes consisten en semiconductores P y N de bismuto-teluro, rodeados por dos placas cerámicas metalizadas. Las placas cerámicas añaden rigidez y aislamiento eléctrico al sistema. Los semiconductores se conectan eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo.

Se han desarrollado termopares en miniatura, que convierten calor corporal en electricidad y generan 40μW con un gradiente de temperatura de 5°C, mientras que por otra parte, existen termopares grandes usados en baterías nucleares RTG (Radioisotope Thermoelectric Generator).

La gran ventaja de esta tecnología es que no existen partes móviles, lo cual permite una operación continua durante muchos años. Tellurex Corporation, una empresa de

producción de termoelectrónica, afirma que esta tecnología es capaz de funcionar durante 100.000 horas de operación continua. Además, no contiene materiales que necesiten ser recargados; y el calor y el frío son reversibles. Una desventaja de la conversión de energía termoeléctrica es la baja eficiencia (menos del 10%). El desarrollo de materiales que sean capaces de operar en gradientes mayores, y que puedan conducir bien la corriente sin conducir el calor (algo que hasta hace poco se tornaba imposible), resultará en un incremento de la eficiencia. En el futuro, se podrá usar el calor desperdiciado, como el motor de un coche, en electricidad.

- Energía electrostática: Este tipo de cosechado se basa en la capacidad variable de varactores (condensadores variables) dependientes de la vibración. Las vibraciones separan las placas de un varactor inicialmente cargado, y la energía mecánica se convierte en energía eléctrica.

Un ejemplo de cosechador de energía electrostática son las Power Kinetic Battery de la empresa M2E (Motion 2 Energy). Se trata de baterías que se recargan al ser agitadas y ya están en el mercado modelos para telefonía móvil. Basan su funcionamiento en la ley de Faraday, ya que contienen un imán que al agitarse genera una fuerza electromotriz en una bobina. Por el momento no podemos depender únicamente de este tipo de carga, pero se espera que sean capaces de aportarnos entre media y una hora extra de conversación.

Otro ejemplo es el Dispositivo Integrado Flexible de Energía (FIED) del CSIRO, que consiste en un “chaleco” en el cual el usuario podrá conectar los aparatos que desee recargar o alimentar; aunque por el momento se está diseñando para aplicaciones militares, es probable que en el futuro los civiles también dispongamos de esta tecnología. Mientras la persona se mueve, el chaleco almacena las vibraciones en las baterías conectadas, o directamente alimenta los aparatos que tenga conectados.

- Células de biocombustible: otra forma de cosechar energía es mediante la oxidación de la glucosa en sangre ó incluso el oxígeno atmosférico. Estos cosechadores se denominan células de biocombustible (biofuel cells) y son capaces de convertir biomasa en electricidad. La biomasa es un material altamente renovable frente al litio, el níquel o el mercurio de las actuales baterías, los cuales son materiales contaminantes, muy poco renovables y pesados.

Actualmente, la mayor parte de la investigación se lleva a cabo mediante la financiación por parte del ejército de los Estados Unidos a la empresa CFDRC. Sacando partido de las excepcionales propiedades de los nanotubos de carbono, se consigue una transferencia directa de los electrones liberados en las reacciones redox, las cuales se producen en la catálisis de la biomasa, hasta unos electrodos donde se fijan.

Se pueden usar para alimentar dispositivos implantados, como por ejemplo marcapasos, biosensores para diabéticos, dispositivos RFID implantados, etc.

- Metabolismo arbóreo: la empresa Voltree ha desarrollado un método para cosechar energía de los árboles. Estos cosechadores de energía se están usando para alimentar sensores remotos y redes, como base para un despliegue a largo plazo de un sistema de monitorización de incendios forestales y estudio climatológico. Su página web dice que la vida útil de estos dispositivos estaría limitada únicamente por la vida del árbol al cual está colocado. Recientemente, se ha desplegado una pequeña red de prueba en un parque forestal de Estados Unidos.

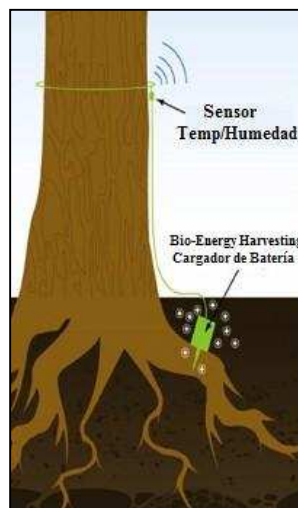


Figura 2: Sistema de metabolismo arbóreo

- Métodos futuros:

- Cosechado de energía mediante polímeros electro activos (EAPs, Electro Active Polymers): Estos polímeros tienen una gran densidad de energía elástica y de deformación (pueden estirarse hasta un 700%), además de una gran eficiencia en conversión de energía. Hasta el momento, este tipo de materiales se empleaban para simular músculo ya que en presencia de una diferencia de potencial se estiran o encogen. Pero recientemente, se ha descubierto que el efecto también puede ser inverso, es decir, que al plegarlos y estirarlos obtenemos una tensión.

- Cosechado de ruido: El laboratorio NiPS en Italia, ha propuesto recientemente cosechar un amplio espectro de vibraciones a baja escala mediante un mecanismo dinámico, no lineal, que mejora la eficiencia del cosechador en casi cuatro veces en comparación con los cosechadores lineales. Se presume, que el peso total de los sistemas basados en EAPs será significativamente menor que los basados en piezoeléctricos.

1.2 Energy Harvesting basado en fuente piezoeléctrica

Una vez visto algunos de los diferentes tipos de Energy Harvesting, se va a centrar la atención en el que nos incumbe a la hora de realizar este proyecto, las fuentes piezoeléctricas. Como ya se ha adelantado, las fuentes piezoeléctricas consisten en generar energía de las deformaciones mecánicas. Estas deformaciones pueden deberse a vibraciones, impactos, cambios de presión, etc.

La piezoelectricidad, es un fenómeno presentado por determinados cristales, que al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización eléctrica en su masa, apareciendo una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie. Este fenómeno también se presenta a la inversa, por lo que se deforman bajo la acción de fuerzas internas al ser sometidos a un campo eléctrico. Además, una vez que se deja de someter a los cristales a un voltaje exterior ó un campo eléctrico son capaces de recuperar su forma inicial.

Los materiales piezoeléctricos son cristales, bien naturales, bien sintéticos, que no poseen un centro de simetría. Cuando estos cristales sufren una deformación, los centros de gravedad de sus cargas positivas y negativas se disocian, dando a lugar a dipolos eléctricos, que se orientan generando una diferencia de potencial entre las superficies del cristal. Pueden distinguirse dos grupos de materiales: los que poseen carácter piezoeléctrico de forma natural, como pueden ser el cuarzo ó la turmalina, y los llamados ferro eléctricos, que adquieren esta propiedad tras ser sometidos a una polarización, como el tantalio de litio.

Por tanto, se puede resumir que un piezoeléctrico es un transductor, es decir, un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de entrada en otra diferente de salida, ya que al ser sometido a un golpe mecánico aparece una diferencia de potencial.

Aunque en este proyecto no se va a realizar un estudio sobre las ecuaciones, tiene interés hacer un breve resumen para poder comprender el funcionamiento de este material.

Las ecuaciones constitutivas de los materiales piezoeléctricos combinan tensiones, deformaciones y comportamiento meramente eléctrico. Esto añadido al uso de material piezoeléctrico en su doble función de sensores y transductores, depende en gran medida de su ubicación, la forma en la que se ven sometidos los estímulos y la tipología y geometría de los mismos. En cualquier caso, la relación entre excitación mecánica y tensión eléctrica

producida en el piezoeléctrico es el principio de cualquiera de las aplicaciones de los mismos.

Las ecuaciones lineales que regulan este comportamiento son:

$$\left. \begin{aligned} T_p &= c_{pq}^E S_q - e_{kp} E_k \\ D_i &= e_{iq} S_q + \varepsilon_0 \varepsilon_{iq}^S E_k \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} S_p &= s_{pq}^D T_q + g_{kp} D_k \\ E_i &= -g_{iq} T_q + (\varepsilon_0 \varepsilon_{iq}^S)^{-1} D_k \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} S_p &= s_{pq}^E T_q + d_{kp} E_k \\ D_i &= d_{iq} T_q + \varepsilon_0 \varepsilon_{iq}^T E_k \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} T_p &= c_{pq}^D S_q + h_{kp} D_k \\ E_i &= -h_{iq} S_q + (\varepsilon_0 \varepsilon_{iq}^S)^{-1} D_k \end{aligned} \right\}$$

En el caso más general, en el que el piezoeléctrico no está sometido a campos eléctricos de excitación, la densidad de carga en un material piezoeléctrico D (Cm^{-2}) viene definida por la ecuación.

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

Siendo:

$d = [d_{ij}]$ la matriz de coeficientes piezoeléctricos del material (CN^{-1}).

$T = [T_n]$ es la matriz de tensiones mecánicas, en tracción σ_{ij} y cizalladura τ_{ij} (Nm^{-2}).

Esto pone de manifiesto las muchas posibilidades que hay tanto de excitar el material como de mejorar su respuesta y su durabilidad.

1.2.1 Aplicaciones basadas en materiales piezoeléctricos

Existen diferentes aplicaciones comerciales que utilizan material piezoeléctrico, una de la más extendida es el encendedor electrónico que en los años 60 popularizara en España la empresa Magiclick®, que contiene en su interior un cristal piezoeléctrico que es golpeado de forma brusca por el mecanismo de encendido. Este golpe seco provoca una elevada concentración de carga eléctrica, que al contacto con el aire se ioniza y es capaz de crear un arco voltaico o chispa que encenderá el mechero.

Otra aplicación muy importante de la piezoelectricidad, pero en este caso al revés, son los inyectores de combustible de los motores de combustión interna. Al aplicarse una diferencia de potencial a un material piezoeléctrico, se consigue abrir el inyector, permitiendo al combustible a muy alta presión entrar en el cilindro. El uso de inyectores piezoeléctricos permite controlar con una enorme precisión los tiempos de inyección y la cantidad de combustible que se introduce en el motor, lo que redundará en mejoras en el consumo, prestaciones y rendimiento de los motores.

Como se ha descrito anteriormente un cristal piezoeléctrico puede utilizarse como sensor de vibración, en donde cada una de las variaciones de presión producidas por la vibración, provoca un pulso de corriente proporcional a la fuerza ejercida. Se ha convertido de una forma fácil una vibración mecánica en una señal eléctrica lista para amplificar, ya que basta con conectar un cable eléctrico a cada una de las caras del cristal y enviar esta señal hacia un amplificador.

Desde tiempo atrás se viene usando material piezoeléctrico en aplicaciones viales, donde entre otras muchas aplicaciones forman parte de los dispositivos sensores utilizados para monitorizar parámetros como la velocidad, el tipo de vehículo o la densidad de tráfico, deformación o sobrecarga de puentes, etc. El país más avanzado en este tipo de aplicaciones es Israel donde este sistema ya ha sido probado con éxito en varios tramos de carretera limitados, donde la energía obtenida del tráfico ilumina la calle.

En este proyecto, se va a centrar la atención en dos tipos específicos de piezoeléctricos el primero en forma de cable y el segundo en un encendedor comercial y en la situación concreta para la cual se ha realizado: la presión ejercida por el tráfico en las vías públicas. Así, como idea general, se pretende aprovechar la energía mecánica producida al paso del vehículo para generar y acumular energía eléctrica, que pueda ser usada para alimentar pequeños dispositivos tales como redes de sensores.

1.3 Fabricantes interesados en esta tecnología

La aparición de la tecnología Energy Harvesting está causando un gran impacto en el mundo de la electrónica. Es por ello que varias compañías ya han comenzado a dedicar parte de su trabajo a fabricar chips especializados para que puedan trabajar con la reducida potencia que genera el Energy Harvesting. Aunque todos los fabricantes tienen chips que podrían adaptarse para este propósito, hasta el momento solo dos de las grandes compañías se han dedicado plenamente a esta tecnología, dedicándole incluso una sección completa dentro de sus páginas web. Estas son Texas Instruments© y Linear Technologies©.

En el sitio web de Texas Instruments© se encuentra una columna con las principales familias de chips relacionados con esta tecnología, centrada principalmente en tres tipos. Los primeros son microcontroladores de muy bajo consumo, especialmente diseñados para aplicaciones con Energy Harvesting. Su consumo oscila entre los $220\mu\text{W}/\text{MHz}$ y los $270\mu\text{W}/\text{MHz}$ cuando están en modo de operación y hasta $0,1\mu\text{A}$ en modo de standby. Además se caracterizan por tener un tiempo muy corto en pasar de standby a modo de operación, en torno a $1\mu\text{s}$. Algunos de estos microcontroladores traen un módulo de radiofrecuencia incorporado, que es otro de los chips que Texas Instruments oferta para Energy Harvesting.

Tabla 1: Comparativa de microcontroladores de Texas Instruments© relacionados con Energy Harvesting

Circuito Integrado	Alimentación	Consumo On	Consumo Standby	Consumo Off	Tiempo Wake-up	SRAM	Flash	Frecuencia
MSP430F249	1.8 – 3.6 V	$270\mu\text{A}-1\text{MHz}$ 2.2v	$0.3\mu\text{A}$	$0.1\mu\text{A}$	$< 1\mu\text{s}$	2048 B	60 kB	16 MHz
MSP430F2132	1.8 – 3.6 V	$250\mu\text{A}-1\text{MHz}$ 2.2v	$0.7\mu\text{A}$	$0.1\mu\text{A}$	$< 1\mu\text{s}$	512 B	8Kb	16 MHz
MSP430F413	1.8 – 3.6 V	$200\mu\text{A}-1\text{MHz}$ 2.2v	$0.7\mu\text{A}$	$0.1\mu\text{A}$	$< 6\mu\text{s}$	256 B	8kB	8 MHz
MSP430F2274	1.8 – 3.6 V	$270\mu\text{A}-1\text{MHz}$ 2.2v	$0.7\mu\text{A}$	$0.1\mu\text{A}$	$< 1\mu\text{s}$	1024 B	32kB	16 MHz
MSP430F2370	1.8 – 3.6 V	$270\mu\text{A}-1\text{MHz}$ 2.2v	$0.7\mu\text{A}$	$0.1\mu\text{A}$	$< 1\mu\text{s}$	2048 B	32kB	16 MHz

Como se acaba de decir, otra posible elección de chip son los drivers de radiofrecuencia. Son chips encargados de comunicarse con microcontroladores y enviar los datos que reciba mediante una antena. Texas Instruments proporciona una amplia gama de software de ejemplo así como el protocolo SimpliciTI que contiene una serie de funciones para manejarlos de manera sencilla.

Tabla 2: Comparativa de drivers RF de Texas Instruments© relacionados con Energy Harvesting

Circuito Integrado	Alimentación	Mín. corriente RX	Consumo Standby	Tiempo Wake-up	Máxima pot. TX	Velocidad Transmisión	Bandas frecuencias
CC1101	1,8 – 3,6 (V)	14 (mA)	0,2 (μA)	240 (μs)	12 (dBm)	500 (Kbps)	300-348 , 387-464 , 779-928 (MHz)
CC2500	1,8 – 3,6 (V)	13,3 (mA)	0,2 (μA)	240 (μs)	1 (dBm)	500 (Kbps)	2400-2483,5 (MHz)
CC2520	1,8 – 3,8 (V)	18,5 (mA)	0,3 (μA)	500 (μs)	4 (dBm)	250 (Kbps)	2394 -2507 (MHz)

Además de los chips descritos anteriormente, TI comercializan chips asociados a electrónica de potencia, en concreto a sistemas de regulación, que se puede dividir en dos partes: la primera son convertidores DC/DC encargados de adaptar la baja tensión que proporcionan algunas fuentes de Harvesting.

Tabla 3: Comparativa de convertidores DC/DC Texas Instruments© relacionados con Energy Harvesting

Circuito Integrado	Corriente máxima de salida [I_{OUT}]	Corriente típica [I_q (typ)]	Tensión entrada	Tensión salida	Frecuencia máxima switch	Límite corriente switch(typ)	Máx Duty Cycle
TPS61220	0,2 (A)	0,005 (mA)	0,7 – 5,5 (V)	1,8 – 5,5 (V)	2000 kHz	0,4 (A)	90 %
TPS62230	0,5 (A)	0,022 (mA)	2,05 - 6 (V)	2,5 - 2,5 (V)	3000 kHz	0,84 (A)	100 %
TPS62240	0,075 (A)	0,011 (mA)	2 - 15 (V)	1,2 – 5,5 (V)	800 kHz	0,25 (A)	100 %
TPS62120	0,3 (A)	0,015 (mA)	2 – 6 (V)	0,6 - 6 (V)	2250 kHz	0,7 (A)	100 %
TPS61200	1,2 (A)	0,05 (mA)	0,3 – 5,5 (V)	1,8 – 5,5 (V)	1250 kHz	1,35 (A)	95 %

En segundo lugar, están los reguladores lineales cuya característica principal es la baja tensión de drop-out que provoca una I_q típica del orden de 500nA.

Tabla 4: Comparativa de reguladores lineales de Texas Instruments© relacionados con Energy Harvesting

Circuito Integrado	Corriente máxima de salida [I_{OUT}]	Tensión de Drop-Out típica [$V_{DO}(typ)$]	Corriente típica [$I_q(yp)$]	Tensión entrada	Tensión salida
TPS78101	0,1 (A)	200 (mV)	0,001 (mA)	2,2 – 5,5 (V)	1,22 – 5,25 (V)
TPS78001	0,1 (A)	200 (mV)	0,0005 (mA)	2,2 – 5,5 (V)	1,22 – 5,25 (V)

Además de estos chips de integración, la compañía Texas Instruments© pone a disposición kits de desarrollo para programar en el entorno Code Composer los microcontroladores anteriormente comentados, así como otros kits con drivers de RF incluidos, como puede ser el eZ430-RF2500 del que se hablará posteriormente ya que ha sido utilizado para realizar la aplicación desarrollada en la parte final de este proyecto.

Por tanto, se puede decir que la compañía Texas Instruments© está desarrollando aplicaciones en torno al Energy Harvesting que no se hubiesen realizado con los sistemas tradicionales de alimentación por baterías, como por ejemplo usando las vibraciones producidas por un vehículo para alimentar sensores en un puente, ó usando sensores solares para monitorizar una granja por radiofrecuencia.

El caso de Linear Technology© es más amplio, esta compañía se ha volcado por completo en el ámbito del Energy Harvesting y se pueden encontrar principalmente chips reguladores para Harvesting de fuentes piezoeléctricas, termoelectricas y solares. Para cada uno de estos tipos de cosechado se ofrecen varios convertidores elevadores/reductores para estabilizar la tensión, capaces de funcionar con un rango de tensiones de entrada muy pequeños, como por ejemplo el LTC3108 que trabaja con tensiones de entrada de 20mV, así como cargadores de baterías con la capacidad de toma de corriente máxima.

Además de estos chips especializados, esta compañía ofrece una amplia selección de productos con corrientes de fuga muy pequeñas utilizados para operar tras los citados reguladores, como amplificadores operacionales, comparadores, DAC's, ADC's o tensiones de referencia, formando así componentes básicos adicionales para sistemas autónomos.

A continuación se describen las principales características de los convertidores DC/DC para las distintas fuentes de energía Harvesting en las que se ha especializado la compañía.

Tabla 5: Comparativa de convertidores DC/DC de Linear Technology® relacionados con Energy Harvesting

Circuito Integrado	Fuente de energía	Corriente límite de pico	Corriente típica [I_q (typ)]	Corriente [I_q (typ)] standby	Tensión entrada	Tensión salida
LTC3105	Solar	0,5 (A)	24 (μ A)	10 (μ A)	0,225 – 5 (V)	1,5 – 5,25 (V)
LTC3108	Termoeléctrica	0,45 (A)	4.5 (mA)	100 (μ A)	>20 (mV)	2,3 – 5,1 (V)
LTC3109	Termoeléctrica	0,5 (A)	12 (mA)	100 (μ A)	>30 (mV)	2,3 – 5,1 (V)
LTC3388	No especificada	210 (mA)	150 (μ A)	720 (nA)	2,7 – 20 (V)	2,6 – 5,1 (V)
LTC3526	No especificada	750 (mA)	500 (μ A)	18 (μ A)	0,5 – 5 (V)	1,5 – 5,25 (V)
LTC3534	No especificada	1,8 (A)	500 (mA)	400 (mA)	2,4 – 7 (V)	1,8 – 7 (V)
LTC3535	No especificada	750 (mA)	500 (μ A)	18 (μ A)	0,5 – 5 (V)	1,5 – 5,25 (V)

Por último, como este proyecto está orientado hacia material piezoeléctrico, es interesante describir los integrados de esta compañía pensados especialmente para este tipo de material.

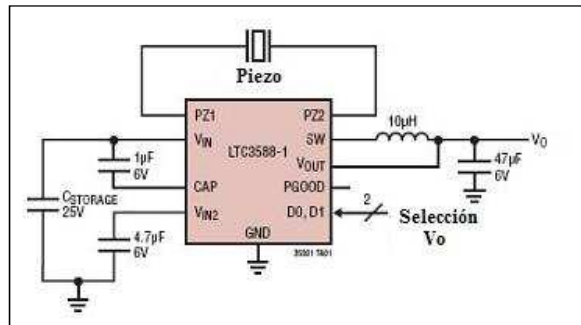


Figura 3: Circuito de aplicación que utiliza el integrado LTC3588 de Linear Technology®

Estos circuitos integrados, LTC3588-1 y LTC3588-2, consisten en una topología rectificadora de onda completa en forma de puente de diodos con un convertidor de alta eficiencia pensada para formar una solución completa de captación de energía en fuentes de alta impedancia de salida como son los transductores piezoeléctricos.

Ante bajas tensiones de entrada dispone de un modo de protección que se caracteriza por tener corrientes de fugas despreciables, unido al uso de un ciclo de histéresis permite acumular carga eléctrica en un condensador. Esta se acumula hasta que el convertidor pueda transferir parte de la carga a la salida de manera eficiente.

Cuando el convertidor no transfiere tensión a la carga, el integrado permanece dormido, con unas corrientes de fugas a la entrada y salida mínimas. El convertidor se enciende y se apaga cuando sea necesario para mantener la regulación.

La tensión de salida se puede seleccionar con un pin a cuatro tensiones diferentes (1,8V, 2,5V, 3,3V y 3,6V), que es la principal diferencia a la hora de escoger entre los integrados ofrecidos, teniendo un máximo de 100 mA de corriente a la salida. Sin embargo, el condensador de salida se puede escoger de otro valor para entregar más corriente.

A continuación se puede observar una tabla con las principales características de estos circuitos integrados.

Tabla 6: Comparativa de circuitos integrados orientados a material piezoeléctrico de Linear Technology©

Circuito Integrado	Tensión de entrada	Corriente típica [I_q(typ)]	Corriente [I_q(typ)] standby	Corriente máxima de pico	Tensión de salida
LTC3588-1	0 – 18 (V)	150 – 250 (μA)	1,7 – 2,5 (μA)	350 (mA)	1,8 – 3,6 (V)
LTC3588-2	0 – 18 (V)	150 – 250 (μA)	1,5 – 2,5 (μA)	350 (mA)	3,45 – 5 (V)

1.4 Materiales utilizados en el proyecto

1.4.2 Cable piezoeléctrico

Uno de los desarrollos industriales más recientes en la tecnología de polímeros piezoeléctricos es su presentación en forma de cable, cuya estructura se presenta en forma de cable coaxial siendo el aislante interno un copolímero piezoeléctrico generalmente del tipo TrFE o de PVDF, es decir polímero ferro-piezoeléctrico. Su funcionamiento es sencillo, cuando el cable es estirado o comprimido, una carga o diferencia de potencial es proporcionalmente generada por la presión.

El cable utilizado en los distintos ensayos realizados a lo largo de este proyecto es el facilitado por la empresa Measurement Specialties© que aparece en la siguiente figura. Esta empresa ofrece dos tipos de cable, espiral y copolímero. La versión copolímero consiste en un tipo especial de piezoeléctrico introducido por extrusión en el cable y posteriormente polarizado, se trata de un material mucho más caro y poco disponible. Por otra parte, el cable espiral consiste en un film PVDF enrollado alrededor de un conductor interno.

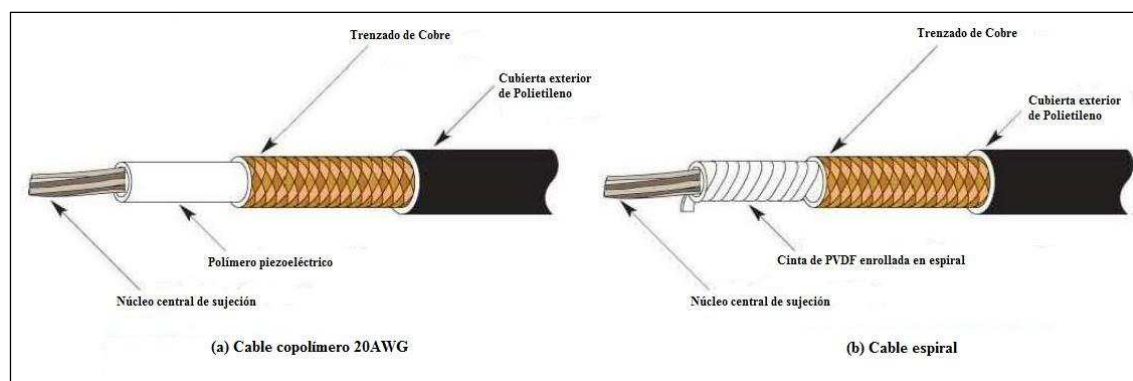


Figura 4: Estructura interna de los cables piezoeléctricos

Para poder comprender el comportamiento de los cables piezoeléctricos y diseñar los circuitos de detección que acondicionan y procesan las señales generadas en el banco de ensayos, se debe modelar eléctricamente al cable utilizando su equivalente Norton como fuente de corriente, en asociación con el elemento capacitivo tal y como se presenta en la siguiente figura. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del cable son las siguientes.

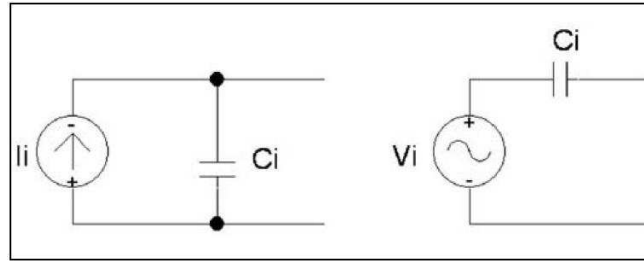


Figura 5: Generador Thevenin y generador Norton del cable piezoeléctrico

Tensión en circuito abierto, siendo t el espesor del aislante piezoeléctrico:

$$V = g_{3n} X_n t$$

Densidad de carga generada en condiciones próximas a cortocircuito, con X_n la presión (N/m^2) en el eje n :

$$D = D_{3n} X_n$$

En la tabla 7, se reproducen las características típicas facilitadas por el fabricante. Esta información resulta insuficiente para modelar el generador equivalente de la figura anterior, ya que no puede reproducir exactamente el comportamiento del cable en las aplicaciones de tráfico rodado. Este modelo se consigue tras realizar el proceso de modelado anteriormente descrito en el apartado 2.2.

Tabla 7: Características típicas de cable piezoeléctrico comercial

Propiedades Típicas	Unidades	Cable espiral	Cable copolímero
Diámetro exterior	mm	2,69	2,72
Capacidad (1kHz)	pF/m	950	655
Peso	Kg/km	14,5	15,5
Resistencia (escudo)	DCR/km	47	47
Tangente delta	(1 kHz)	0,016	0,017
Coeficiente Hidrostático Piezoeléctrico	pC/N	20	15
	Vm/N		$150 \cdot 10^{-3}$
Resistencia (centro)	DCR/km	31	31

1.4.2 Encendedor comercial

Los encendedores comerciales están formados por un material cerámico piezoeléctrico, este material esta formado por dos cilindros con un contacto en medio. Éste tipo de materiales produce una tensión cuando sufren una deformación.

Existen dos tipos de tipos de encendedores:

- Los sistemas de una sola chispa, aunque en realidad no son de una única chispa sino que son dos chispas muy rápidas. En este tipo de encendedores cuando se oprime un botón que comprime un resorte en cuyo extremo se encuentra un trozo solido de metal. Cuando el botón llega a un determinado lugar corre un pestillo que libera un trozo metálico y se estrella con el material cerámico. Al recibir el golpe el cerámico se comprime y en esa deformación produce una tensión varios miles de voltios la cual genera la chispa y seguidamente se descomprime lo que provoca la segunda chispa.
- El segundo tipo son los sistemas multichispas el material piezoeléctrico esta colocado en un fuerte marco metálico. En este sistema al pulsar el botón comprime una palanca que traslada una fuerza compresora provocando que el material piezoeléctrico se deforme provocando una tensión. Cuando la tensión es suficientemente grande para provocar la ionización del aire se produce la chispa., pero la deformación continua y produce otra chispa y así sucesivamente hasta completar el recorrido del botón. Al llegar al final del recorrido la palanca se afloja y el material cerámico se estira, como este estiramiento también provoca una deformación provocando otra sucesión de chispas pero de signo contrario al recorrido de compresión.

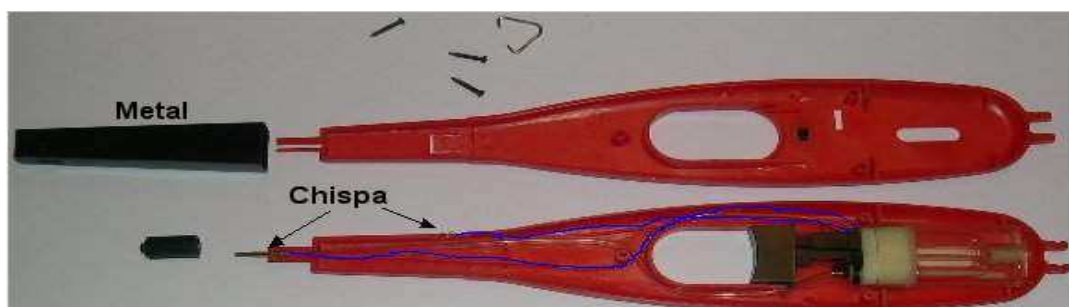


Figura 6: Encendedor comercial abierto.

Capítulo 2

Mejora de los modelos eléctricos

2.1 Tipos de señales y Banco de ensayo

En este proyecto se ha trabajado con cuatro señales obtenidos del cable piezoeléctrico. Estas cuatro se pueden dividir en dos, las que se han obtenido de un banco de ensayo en el laboratorio y las obtenidas en los ensayos de campo.

Para poder realizar pruebas que simulen las condiciones de un entorno real de tráfico se ha utilizado un banco de ensayos que se realizó en un proyecto anterior. El diseño del banco ha considerado tráfico continuo de vehículos, intentando imitar la generación de respuestas en los materiales idénticas a las recogidas bajo el asfalto de una vía, cubriendo sobradamente las condiciones de tráfico real puesto que permite testar un rango de velocidad de entre 14 y 170 km/h.

El banco de ensayos está formado por una plataforma giratoria de diferentes configuraciones accionada por un motor, bajo una consigna de tensión determinada, y controlado mediante un sistema que permite la rodadura a diferentes velocidades, pesos y separación relativa entre ejes. Con la intención de someter al material piezoeléctrico a excitaciones como las que se puedan dar bajo tráfico real se han seleccionado ruedas industriales con cámara de aire con un perfil de rodadura lo más próximo a la pisada de una rueda estándar real para poder reproducir las condiciones dinámicas de un automóvil de tipo medio.

Para poder reproducir las condiciones de un automóvil pesado se ha dispuesto de unas barras perpendiculares a la tabla superior donde se puedan insertar pesas deportivas, esto hace que el peso de la tabla sea mayor y por tanto aumente el impacto sobre el piezoeléctrico. Para someter a los cables a excitaciones que provengan de tráfico pesado se dispone en el banco de ensayos de unas piezas almohadilladas semirrígidas que adaptan el ancho de pisada y amplifican mecánicamente el estímulo de presión consiguiendo un mayor valor de amplitud de la señal piezoeléctrica.

Una vez explicado brevemente el banco de ensayos se van a diferenciar dos señales obtenidas en a partir de él. La primera de estas señales la hemos llamado señal con amplificación mecánica y se ha obtenido insertando unas pesas en el banco de ensayos para que aumente el impacto en el cable. La otra señal obtenida en el banco de ensayos la hemos llamado señal sin amplificación mecánica, esta señal se obtiene excitando el cable

piezoeléctrico sin las pesas únicamente con el peso de la plataforma. Para obtener la señal del material piezoeléctrico de un encendedor también se ha utilizado el banco de ensayos sin añadir pesas.

Las otras dos señales con las que se han trabajado durante este proyecto se han obtenido de ensayos en el exterior del campus. La primera de estas señales la hemos denominado señal en el exterior enterrada. Esta señal se obtiene de un cable que se encuentra enterrado en una instalación realizada en el vial del campus. Y la última señal con la que se ha trabajado proviene de un cable piezoeléctrico colocado encima de la calzada, la señal proveniente de este cable se ha denominado señal en el exterior al aire.

2.2 Metodología para la obtención de modelos eléctricos equivalentes de la que partimos

Antes de explicar la metodología utilizada para la mejorar la obtención de los modelos equivalentes, explicaré la metodología utilizada en el PFC **Alimentación Energy Harvesting basada en fuentes piezoeléctricas**. Esta metodología es de la que hemos partido para conseguir mejorar la obtención del modelo eléctrico.

Mediante el uso del osciloscopio TDS7054 de la empresa Agilent Technologies®, con función de guardado de muestras, se han obtenido una serie de capturas de formas de onda, en formato de imagen PNG y en formato de tabla de datos de Excel CSV, para diferentes velocidades, que posteriormente serán usados para modelar con PSpice OrCAD® los cables piezoeléctricos. Estas medidas se han realizado con sonda de prueba 10073C (10:1, 500MHz BW), seleccionando $1M\Omega$ como impedancia de entrada. El valor de la impedancia de entrada del equipo resulta muy importante, puesto que el equivalente eléctrico del material piezoeléctrico es el de una fuente de alta impedancia de salida.

En los ensayos con cable piezoeléctrico, el valor de la capacidad del cable es muy pequeño, ya que disponemos de 3 metros de longitud con lo que atendiendo a las características del cable piezoeléctrico de la empresa Measurement Specialties® descritas anteriormente, la capacidad resulta ser 3nF. Este valor de capacidad, unido al bajo rango de frecuencias de excitación correspondientes a las aplicaciones viales, hace que la impedancia terminal del sistema de medida sea crucial para justificar los valores de amplitud recogidos. A continuación se va a explicar detenidamente como a partir de una señal proveniente del banco de ensayos, se puede conseguir un modelo eléctrico equivalente en el programa PSpice OrCAD.

Para realizar este proceso se utiliza la señal adquirida que puede verse en la figura 7. Por tanto, con ella se va a realizar todo el proceso para la obtención del modelo equivalente de cable piezoeléctrico.

El archivo CSV contiene los datos guardados por el osciloscopio separados por comas, siendo el primero el dato temporal y el segundo el valor de amplitud de tensión en el canal elegido para ese instante de tiempo. En total son mil filas, en donde la variable temporal está equiespaciada una distancia igual a diez veces menor que la configuración t_{div} (tiempo por división) del osciloscopio en el momento de la grabación del archivo.

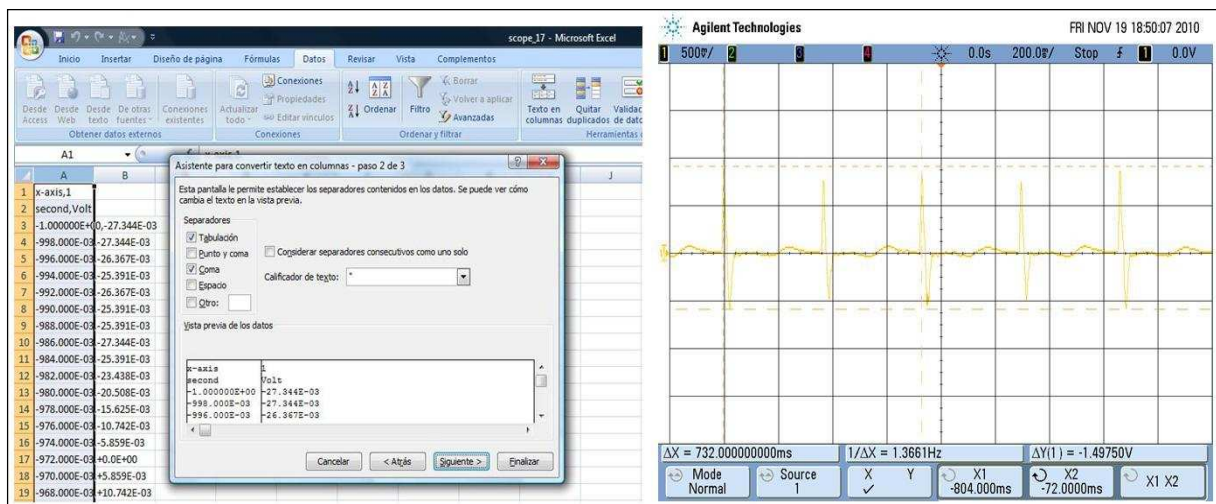


Figura 7: Ejemplo de archivos procedentes del osciloscopio para su posterior modelado

Una vez conocido el formato del fichero CSV procedente del osciloscopio, se abre el programa Excel de Microsoft® para pasar los datos separados por comas a columnas independientes, teniendo así una columna con los valores de la variable temporal y otra con los valores de tensión de la señal. Este proceso de separación es sencillo, se realiza en tres pasos:

- 1) Una vez abierto el fichero CSV se accede a la pestaña datos.
- 2) Se pincha en “Texto en columnas” que se encarga de dividir el contenido de una celda en varias columnas.
 - 2.a) El primer paso es marcar la opción “Delimitados” como tipo de datos originales existentes.
 - 2.b) Indicar que el separador es la “coma” (.). Este paso se puede observar en la figura 8.
 - 2.c) Establecer como “General” el formato de los datos en las columnas.

3) Se pulsa “Finalizar” y se da por terminado el proceso puesto que ya se han separado los datos en columnas independientes.

Además de todo este proceso, es necesario cambiar la configuración del programa Excel para usar como delimitador decimal el punto y no la coma, ya que el programa PSpice OrCAD® con el que se realizará el modelado de la señal, está configurado según la nomenclatura inglesa.

Posteriormente, se necesita que la variable temporal empiece desde cero, por tanto, si fuera necesario habría que modificarlo para hacerlo así, siempre prestando atención a que el avance temporal entre muestras consecutivas sea el mismo que en el CSV original. Una vez realizado este proceso, se seleccionan las dos columnas y se pasan a un fichero de texto .txt para poder utilizarlos en el PSpice.

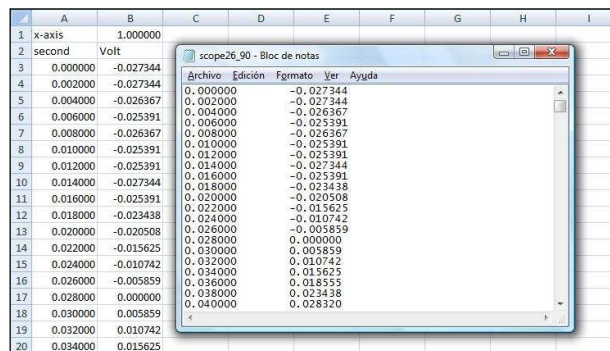


Figura 8: Paso de los datos desde Excel a un fichero de texto para su posterior utilización

Una vez que está listo el archivo de texto, se puede dar por cerrado el proceso de edición del archivo CSV. El siguiente paso consiste en simular la señal original con el programa PSpice OrCAD®.

Antes de realizar la simulación se tiene que crear un proyecto de simulación en el programa Capture CIS de PSpice. Esto se realiza de la siguiente manera:

- 1) File → New → Project
- 2) Asignar un nombre identificativo al proyecto y seleccionar la opción “Analog or Mixed A/D” con la cual podemos acceder a un esquemático para simular la señal.
- 3) Por último, se tiene que asignar un path determinado para guardar el proyecto.

Teniendo el archivo de texto y el proyecto ya creado, ya se puede reconstruir la señal captada por el osciloscopio en el programa de simulación. Para poder reconstruir dicha señal es necesario utilizar un generador de onda denominado “VPWL_F_RE_FOREVER”, que consiste en representar los datos de un fichero de datos procedente de un path elegido por el usuario. Este generador representa en PSpice los datos contenidos en el fichero de texto de manera periódica, es decir, repitiéndola tantas veces como sean necesarias para completar el tiempo establecido de simulación.

Es importante tener en cuenta que el path seleccionado no debe ser excesivamente largo, como mucho una línea, puesto que de lo contrario aparece un error de OrCAD. Una buena solución a este problema es crearse una carpeta raíz en el directorio local del disco duro, y copiar en ella todas las capturas que se vayan a recrear, como por ejemplo en este caso: “C:\Scopes\scope_26_90.txt”.

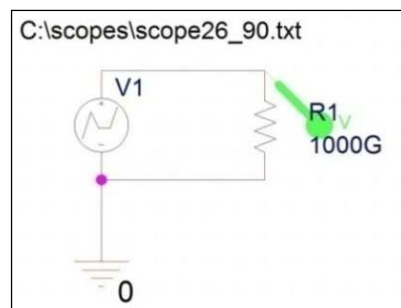


Figura 9: Generador VPWL_RE_FOREVER encargado de recrear la señal original

Para que la señal representada sea fiel a la original, es necesario poner una carga en bornas del generador de un valor suficientemente alto, que simule un circuito abierto, el valor elegido de carga es de $1000\text{G}\Omega$ para conseguir esto. Así se consigue una representación fidedigna y periódica de la señal original como puede observarse en la figura 9.

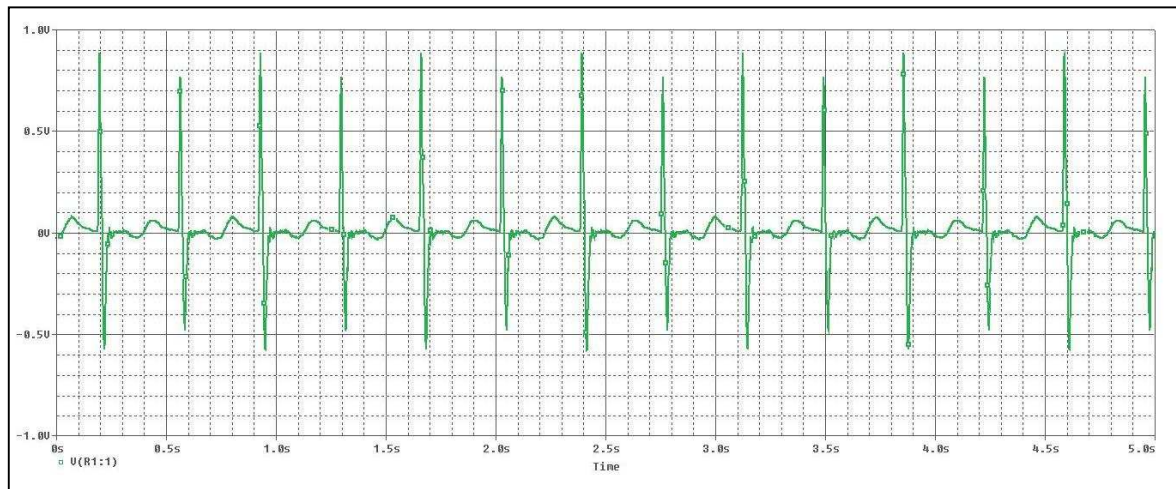


Figura 10: Señal recreada por el generador VPWL_RE_FOREVER

Una vez recreada la señal original proveniente del banco de ensayos es necesario medir el periodo de la señal utilizando los cursores de PSpice para conseguir su frecuencia fundamental. Este dato es muy importante ya que es el utilizado para poder realizar la transformada de Fourier, con la cual obtendremos el modelo eléctrico equivalente. Esta señal presenta un período $\Delta T = 0,732$ s y por tanto su frecuencia fundamental:

$$f_f = \frac{1}{\Delta T} = 1,36612 \text{ Hz}$$

El modelo equivalente eléctrico de la señal se va a crear a partir de los coeficientes de Fourier de dicha señal, esto es debido a que se va a modelar la señal original como una suma de generadores independientes con los parámetros de amplitud y fase determinados por los coeficientes.

Para poder disponer de estos coeficientes es necesario habilitar la opción destinada a ellos en el programa PSpice, ésta se encuentra dentro de la ventana Capture, en las opciones de simulación, una vez en éstas, es necesario pulsar un botón denominado “Output File Options”. Este incluye dentro del fichero de texto .out, que se genera automáticamente en el momento de realizar una simulación, los coeficientes procedentes de la realización de la transformada de Fourier de la señal tomando como frecuencia fundamental la anteriormente calculada.

Para esto, en la pestaña que aparece tras pulsar el botón hay que rellenar los siguientes parámetros:

- “Print values in the output file every”: Valor en segundos que debe equiespaciarse las muestras de la señal, se pone el mismo valor de paso entre muestras que aparecía en el CSV original. En este caso 2ms.
- “Perform Fourier Analysis”: Se marca esta opción para obtener los coeficientes de Fourier.
- “Center frequency”: Frecuencia central sobre la que se va a realizar la transformada de Fourier. Este valor es el obtenido anteriormente, $f_f = 1,366$ Hz.
- “Number of Harmonics”: Número de contribuciones o coeficientes de Fourier que van a aparecer en el fichero de salida, se ha elegido 75 ya que con estas muestras son suficientes para caracterizar la señal de manera adecuada. El número máximo de armónicos que se pueden calcular es de 100, si se necesitasen más, habría que buscar otra solución, puesto que PSpice da un error.
- “Output Variables”: Señal de la que se va a realizar el estudio de los coeficientes de Fourier.

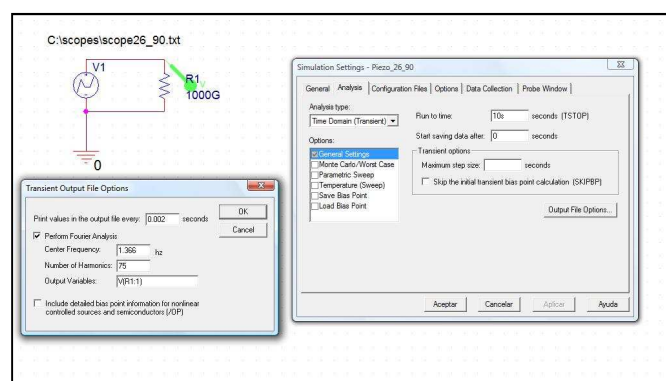


Figura 11: Condiciones de simulación necesarias para obtener los coeficientes de Fourier

Una vez que se vuelve a simular la señal, aparece en el fichero de salida (.out) una serie de columnas de datos como el número de armónico, frecuencia, amplitud, amplitud normalizada, fase y fase normalizada. De todas estas, las columnas que se van a utilizar son las asociadas a los valores de amplitud y de fase, puesto que el valor dado de frecuencia viene con únicamente 3 decimales y para ser más exacto se utiliza la frecuencia con 6 decimales, calculada en un fichero de Excel adicional, ya que se ha comprobado que se produce un error creciente con el tiempo. Este valor de frecuencia es fácil de calcular, consiste en la multiplicación de la frecuencia fundamental por el armónico del que se quiere conocer la frecuencia.

Todos estos datos son copiados a un fichero Excel para manejarlos con mayor facilidad.

Tabla 8: Parámetros obtenidos en el fichero output generado por el programa OrCAD® PSpice

Armónico	Frecuencia (Hz)	Componente Fourier	Componente Fourier normalizada	Fase (°)	Fase normalizada (°)
1	1.37	0.002090	1	-45.780	0
2	2.73	0.039270	18.790	139.700	231.30
3	4.10	0.004121	1.972	-15.410	121.90
4	5.46	0.012580	6.018	116.200	299.30
5	6.83	0.005352	2.561	-112.200	116.80
6	8.20	0.056630	27.100	50.450	325.20
7	9.56	0.007216	3.453	-121.600	198.80
8	10.93	0.049560	23.720	21.580	387.90
9	12.29	0.007216	3.453	-167.200	244.90
10	13.66	0.060260	28.840	-19.780	438.10
11	15.03	0.009174	4.390	155.000	658.60
12	16.39	0.066220	31.690	-54.770	494.60
13	17.76	0.008560	4.096	121.600	716.70
14	19.12	0.067730	32.410	-92.730	548.20
15	20.49	0.008009	3.833	94.580	781.30

Con los datos provenientes de la transformada de Fourier se va a tratar de reconstruir la señal original a partir de sus componentes de frecuencia. Para verificar que los coeficientes de Fourier son correctos y que no se ha producido ningún error, se va a crear un bloque jerárquico dentro del cual se van a colocar las 75 contribuciones de Fourier.

La creación de un bloque jerárquico es sencilla, estando en la ventana de esquemático Capture se pincha en la opción “Place hierarchical block” que aparece a la derecha de la pantalla, que se encarga de la creación del bloque jerárquico. Para esto, hay que asignar:

- Un nombre, que debe ser el mismo tanto en el campo “Reference” como en el “Implementation name”.
- Una implementación de tipo: “Schematic view”. En la cual aparecerá una nueva página de esquemático donde se colocan los 75 generadores sinusoidales en serie.
- El campo “Path and filename” no se rellena.

Una vez que se han rellenado los parámetros necesarios para la creación del bloque jerárquico, es el momento de dibujar la forma del bloque, en este caso se hace un cuadrado como puede observarse. El último paso consiste en incluir pines al bloque jerárquico, estos se usaran para poder interconectar bloques y otros elementos como resistencias o condensadores.

Para poder asignar pines a un bloque jerárquico hay que pinchar en la opción “Place pins” teniendo seleccionado dicho bloque, esta opción aparece a la derecha en la ventana de Capture. Una vez pulsada esta opción aparece una ventana en la que hay que asignar:

- Un nombre en el campo “Name”.
- El tipo de pin utilizado, en el campo “type” se ha de elegir “Passive”.
- El ancho del pin, como es simple se elegirá dentro del campo “Width” la opción “Scalar”.

En la siguiente figura aparece el proceso completo de creación de un bloque jerárquico.

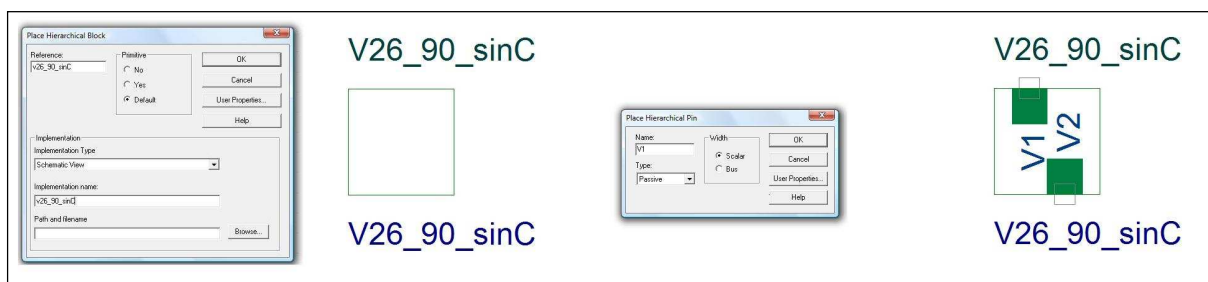


Figura 12: Proceso de creación de un bloque jerárquico

Una vez creado el bloque jerárquico se va a utilizar su esquemático para trabajar en él, para poder acceder al esquemático, se ha de pulsar con el botón derecho del ratón sobre el bloque y seleccionar la opción “Descend Hierarchy”. En este esquemático aparecen los pines creados anteriormente.

Una vez verificado se procede a recrear la señal utilizando 75 generadores de tipo sinusoidal “ V_{\sin} ”, uno por cada contribución, colocados en serie cada cual con los valores de frecuencia, amplitud y fase correspondiente a cada uno de los valores asociados a un armónico diferente, además de offset nulo. En la siguiente figura puede observarse el esquemático interno del bloque jerárquico.

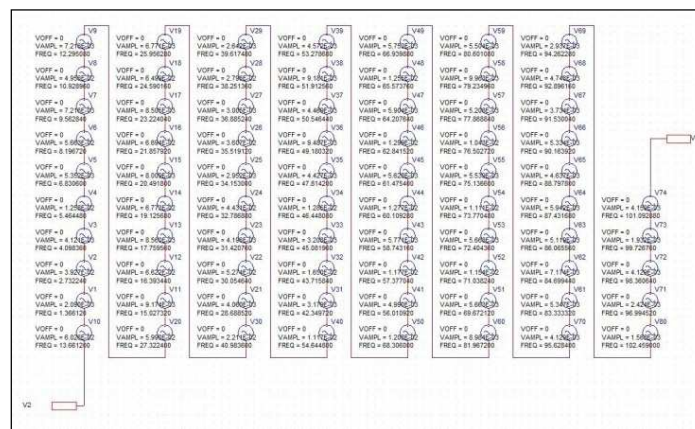


Figura 13: Esquema interno del bloque jerárquico formado por 75 generadores sinusoidales

La siguiente figura es una captura de los parámetros que tiene el generador V_{\sin} en el entorno PSpice para el primer armónico de la señal utilizada. Como se ha explicado anteriormente, los parámetros que hay que modificar son:

- **FREQ:** Frecuencia relacionada con el armónico.

Esta debe tener seis decimales.

- **PHASE:** Valor en grados de la fase procedente del fichero output obtenido anteriormente.

- **VAMPL:** Valor en voltios del módulo procedente del fichero output obtenido anteriormente.

A	
	V26_90_sinC : V26_90
AC	
BiasValue Power	
Color	Default
DC	
Designator	
DF	0
FREQ	1.366120
Graphic	VSIN.Normal
ID	
Implementation	
Implementation Path	
Implementation Type	PSpice Model
Location X-Coordinate	120
Location Y-Coordinate	370
Name	INS51544
Part Reference	V1
PCB Footprint	
PHASE	-4.578E+01
Power Pins Visible	
Primitive	DEFAULT
PSpiceOnly	TRUE
PSpiceTemplate	V*@REFDES %* %- ?DCD
Reference	V1
Source Library	C:\ORCAD\ORCAD_10
Source Package	VSIN
Source Part	VSIN.Normal
TD	0
Value	VSIN
VAMPL	2.090E-03
VOFF	0

Figura 14: Parámetros del generador V_{\sin}

Para poder editar de forma rápida los parámetros de frecuencia, módulo y fase de cada uno de los armónicos es necesario:

- 1) Seleccionar en el esquemático los 75 generadores.
- 2) Pulsar botón derecho del ratón y seleccionar la opción “Edit Properties”.
- 3) Una vez en las propiedades, se pulsa con el botón derecho del ratón y seleccionar la opción “Pivot”, donde aparecen ordenadas las columnas en función de cada uno de los 75 generadores como puede observarse en la imagen.
- 4) El último paso, consiste en actualizar los datos de los parámetros de frecuencia, módulo y fase de cada generador seleccionando los datos del fichero Excel y copiándolos en las columnas correspondientes.

	AC	Color	DC	Designator	DF	FREQ	PHASE	VAMPL	Graphic	ID	Implementation	Implementation Path	Implementation Type	Location X-Coordinate	Location Y-Coordinate
1	V26_90_sinC : V26_90_sinC : V1	Default			0	1.366120	-4.578E+01	2.090E-03	VSIN.Normal				PSpice Model	120	370
2	V26_90_sinC : V26_90_sinC : V2	Default			0	2.732240	1.397E+02	3.927E-02	VSIN.Normal				PSpice Model	120	330
3	V26_90_sinC : V26_90_sinC : V3	Default			0	4.098360	-1.541E+01	4.121E-03	VSIN.Normal				PSpice Model	120	290
4	V26_90_sinC : V26_90_sinC : V4	Default			0	5.464480	1.162E+02	1.258E-02	VSIN.Normal				PSpice Model	120	250
5	V26_90_sinC : V26_90_sinC : V5	Default			0	6.830600	-1.122E+02	5.352E-03	VSIN.Normal				PSpice Model	120	210
6	V26_90_sinC : V26_90_sinC : V6	Default			0	8.196720	5.045E+01	5.663E-02	VSIN.Normal				PSpice Model	120	170
7	V26_90_sinC : V26_90_sinC : V7	Default			0	9.562840	-1.216E+02	7.216E-03	VSIN.Normal				PSpice Model	120	130
8	V26_90_sinC : V26_90_sinC : V8	Default			0	10.92896	2.158E+01	4.956E-02	VSIN.Normal				PSpice Model	120	90
9	V26_90_sinC : V26_90_sinC : V9	Default			0	12.29508	-1.672E+02	7.216E-03	VSIN.Normal				PSpice Model	120	50
10	V26_90_sinC : V26_90_sinC : V10	Default			0	13.66120	-1.978E+01	6.026E-02	VSIN.Normal				PSpice Model	120	410
11	V26_90_sinC : V26_90_sinC : V11	Default			0	15.02732	1.550E+02	9.174E-03	VSIN.Normal				PSpice Model	220	370
12	V26_90_sinC : V26_90_sinC : V12	Default			0	16.39344	-5.477E+01	6.622E-02	VSIN.Normal				PSpice Model	220	330
13	V26_90_sinC : V26_90_sinC : V13	Default			0	17.75956	1.216E+02	6.560E-03	VSIN.Normal				PSpice Model	220	290
14	V26_90_sinC : V26_90_sinC : V14	Default			0	19.12568	-9.273E+01	6.773E-02	VSIN.Normal				PSpice Model	220	250
15	V26_90_sinC : V26_90_sinC : V15	Default			0	20.49180	9.458E+01	8.009E-03	VSIN.Normal				PSpice Model	220	210

Figura 15: Proceso de edición de las propiedades de los 75 generadores

En este caso, como lo que se quiere es verificar los coeficientes de Fourier calculados, se debe cargar al sistema con una resistencia lo suficientemente grande para que realice un comportamiento de circuito abierto, es por esto, que la resistencia de carga que se ha colocado tiene un valor de $1000G\Omega$.

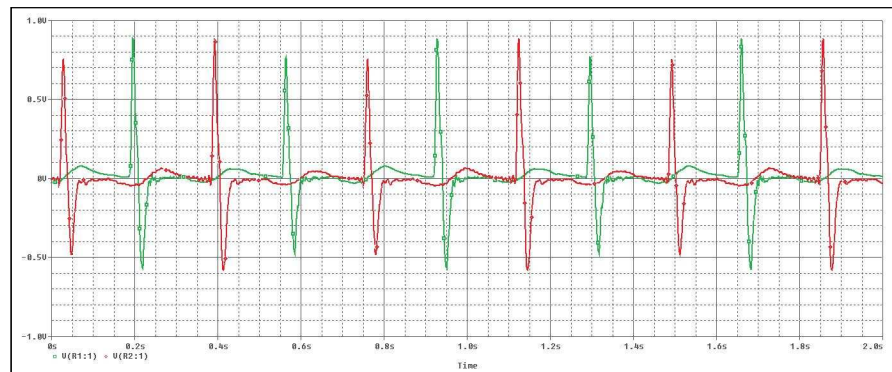


Figura 16: Señal original procedente del banco de ensayos (verde)

Al simular aparece un ligero desfase entre las señales, éste dependiendo de la frecuencia fundamental puede ser mayor ó menor. En este caso, como la frecuencia es mayor que 1 la señal producida con los coeficientes de Fourier está adelanta a la original.

Para comparar que las señales se superponen a la perfección se mide con los cursores del simulador el tiempo transcurrido entre las señales y se le incluye el retardo resultante en la columna Td de cada uno de los 75 generadores que conforman la señal. Así se verifica que la señal se superpone a la perfección. Una vez comparadas las señales, se quita este retardo.

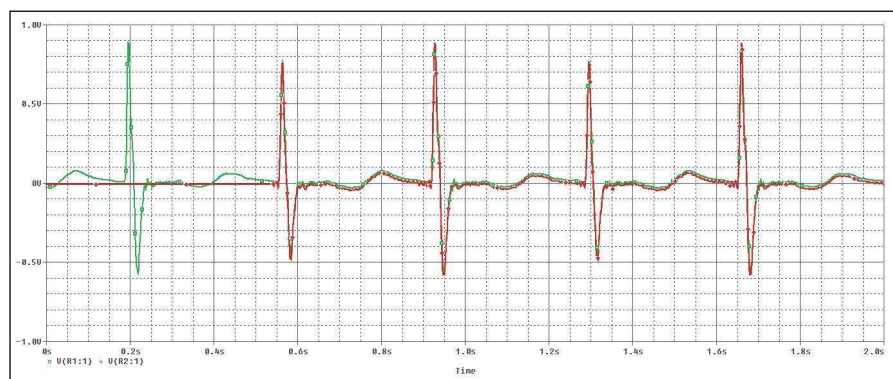


Figura 17: Señal original procedente del banco de ensayos (verde)

Para dar por válida esta señal es necesario visualizar la transformada de Fourier, se trata de un proceso sencillo, puesto que en la ventana de simulación del PsPICE existe un botón denominado FFT (Fast Fourier Transform) que consiste en dibujar las contribuciones de Fourier obtenidas anteriormente.

Como se puede observar en la figura 19, las contribuciones de la señal original y de la obtenida a través de los coeficientes de Fourier es prácticamente la misma, superponiéndose entre ambas. Por tanto, se puede empezar a realizar el modelo eléctrico equivalente, ya que se dan por válidas las contribuciones obtenidas.

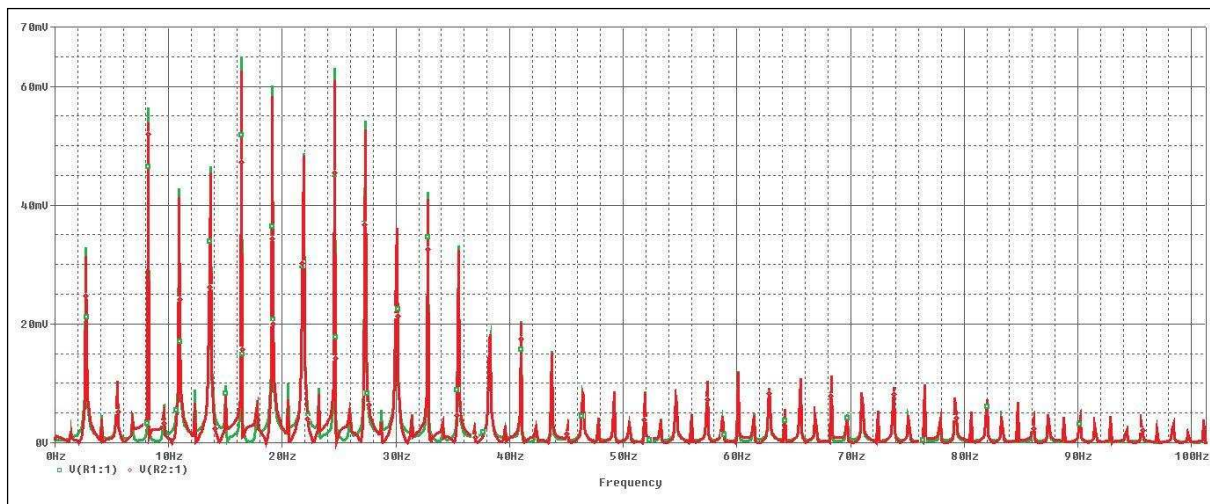


Figura 18: Transformada de Fourier para la señal original (verde)

Una vez que se ha logrado reproducir de manera correcta la señal original, usando los coeficientes de Fourier, es el momento de hacer el modelo equivalente. Como se ha comentado con anterioridad, el cable tiene una impedancia de salida muy alta ya que se trata de un cable de tres metros de longitud. Esta capacidad se ha obtenido a partir de las hojas de características del cable y se aplica el modelo eléctrico para el mismo que sugiere el propio fabricante, como se ha visto en la figura de los equivalentes Thèvenin o Norton.

Para estudiar cuál es el modelo interno del cable a partir de las contribuciones armónicas obtenidas en la señal registrada en el osciloscopio, se utiliza la fórmula del divisor de tensión formado por la impedancia de la sonda de $1\text{M}\Omega$ y el condensador de 3nF del cable piezoeléctrico, procediendo a despejar de ella el valor de tensión buscado para los generadores equivalentes del modelo Thèvenin del cable.

Por tanto, conociendo los valores relacionados con la frecuencia fundamental y el valor de amplitud y fase de cada una de las contribuciones de Fourier disponibles, se calculará el valor del módulo y fase relativos para cada frecuencia de los generadores internos, es decir, se aplica el principio de superposición.

A continuación, se muestra un esquema del divisor de tensión así como la relación de fórmulas empleadas para conseguir los valores finales de módulo y fase. Para agilizar este paso se ha creado un fichero Excel que realiza las operaciones.

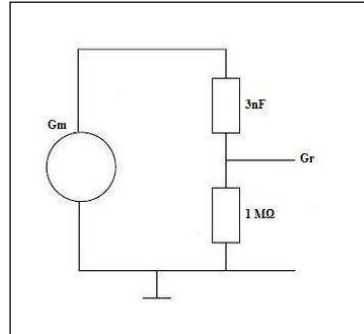


Figura 19: Divisor de tensión utilizado para conseguir el modelo eléctrico equivalente

Conocidos los valores de frecuencia (f), módulo (A) y fase (ph_{\circ}) relativos a las contribuciones de Fourier de la señal original, y siendo la estructura de un número complejo $z = x + yj$:

- Fase medida (rad): Como los cálculos a realizar van a tratar números complejos, el ángulo se va a necesitar en radianes.

$$ph_{rad} = ph_{\circ} \cdot \frac{2\pi}{360}$$

- Generador medido (G_m): Convierte los coeficientes de Fourier relativos a amplitud y fase a números complejos.

$$G_m = [\cos(ph_{rad}) \cdot A] + [\sin(ph_{rad}) \cdot A] \cdot j$$

- Impedancia: Se trata de la impedancia producida por la capacidad de 3nF.

$$Imp = -\frac{1}{(2\pi \cdot f \cdot 3 \cdot 10^{-12})}$$

- Generador Real: Valor buscado en el divisor de tensión. Siendo la impedancia del osciloscopio de $1M\Omega$.

$$G_r = \frac{G_m * (Imp + 1 \cdot 10^6)}{1 \cdot 10^6}$$

División de números complejos:

$$\frac{(a + bj)}{(c + dj)} = \frac{(ac + bd) + (bc - ad)j}{(c^2 + d^2)}$$

Producto de números complejos:

$$(a + bj)(c + dj) = (ac - bd) + (ad + bc)j$$

Suma de números complejos:

$$(a + bj) + (c + dj) = (a + c) + (b + d)j$$

- Módulo Real: Valor absoluto de un número complejo.

$$|mod| = \sqrt{x^2 + y^2}$$

- Fase real: Argumento ó angulo θ .

$$\theta_{rad} = \tan^{-1} \left| \frac{y}{x} \right| ; \quad \theta^\circ = \theta_{rad} \cdot \frac{360}{2\pi}$$

Tabla 9: Parámetros utilizados para la creación del modelo eléctrico equivalente

Armónico	Frecuencia	Módulo Medido	Fase Medida (°)	Fase Medida (rad)	Generador Medido	Impedancia	Generador real	Módulo Real	Fase Real (rad)	Fase Real (°)
1	1.36612	0.00209	-45.78	-0.799011732	0.00145759799661815 -0.00149783446356891j	-8833812.3278324j	-0.0567090244597764 -0.0581019215136626j	0.081189573	-2.344062993	-134.3049164
2	2.73224	0.03927	139.7	2.438224965	-0.0299499853071497 +0.0253994346413758j	-9416906.1639162j	0.463228453740967 +0.60693548896097j	0.763512468	0.918884687	52.64821442
3	4.09836	0.00412	-15.41	-0.268955238	0.00397284609905036 -0.00109505016928922j	-2944604.1092775j	-0.0102021448221959 -0.0525219701085836j	0.053503655	-1.762652429	-100.9925449
4	5.46448	0.01258	116.2	2.028072591	-0.00555414362812015 +0.0112875102905031j	-708453.08195811j	0.104030120439349 +0.0652096531145642j	0.122778519	0.559917312	32.08089888
5	6.8306	0.00535	-112.2	-1.958259421	-0.00202220389105244 -0.00495525936990309j	-766762.46556649j	-0.0405085263723624 +0.010750717908845j	0.041910842	2.882178857	165.1366843
6	8.19672	0.05663	50.45	0.880518608	0.0360592288072347 +0.0436656491744654j	-472302.05463874j	0.318676499676261 -0.189720571523288j	0.37087546	-0.536985299	-30.76699129
7	9.56284	0.00721	-121.6	-2.12232037	-0.00378108229748009 -0.00614606155677623j	-547687.47540463j	-0.0378775110190735 +0.0148302013484282j	0.040677275	2.768408813	158.6181409
8	10.92896	0.04956	21.58	0.376642053	0.0460860882787846 +0.0182281668623062j	-854226.54097905j	0.134569739655186 -0.205484146030474j	0.245627256	-0.9909904	-56.77956745
9	12.29508	0.00721	-167.2	-2.918190509	-0.00703667774066894 -0.00159869395882208j	-314868.03642583j	-0.0139348312036174 +0.0287636419070195j	0.03196133	2.02193475	115.8483276
10	13.6612	0.06026	-19.78	-0.345226126	0.0567045969361193 -0.0203925546784177j	-883381.23278324j	-0.0224874671905541 -0.24059812232681j	0.241646731	-1.663990434	-95.33962902
11	15.02732	0.00917	155	2.705260341	-0.00831446763827423 +0.00387709993320918j	-530346.57525749j	0.00537303883286184 +0.033230052285098j	0.033661639	1.410491582	80.81521471
12	16.39344	0.06622	-54.77	-0.955916831	0.0381996753718632 -0.0540913412801372j	-236151.02731937j	-0.136848074280935 -0.177711259978059j	0.224295982	-2.227011797	-127.5983769
13	17.75956	0.00856	121.6	2.12232037	-0.00448531935510388 +0.00729078255626449j	-987216.33291019j	0.0172938253766661 +0.020689401792149j	0.026965306	0.874557886	50.10847578
14	19.12568	0.06773	-92.73	-1.618443815	-0.0032259434391989 -0.0676531314049588j	-773843.73770232j	-0.190885158327517 -0.0587048683848598j	0.1997083	-2.843232639	-162.9052304
15	20.4918	0.00800	94.58	1.650732407	-0.000639526482666319 +0.00798342576078518j	-258920.8218555j	0.020028930699168 +0.009639109187882j	0.022227696	0.448542961	25.69961861

En la tabla anterior, se observan los pasos que han sido necesarios para poder conseguir el generador real para cada una de las contribuciones de Fourier. De esta tabla se utilizarán el valor de módulo real y fase real (°) para la realización del modelo eléctrico equivalente. Además, en el Anexo I se encuentran las 75 medidas del generador real. Una vez calculados el módulo y la fase del generador real de cada una de las 75 contribuciones de Fourier, se crea un nuevo bloque jerárquico igual que el anterior, en este caso hay que colocar un condensador de 3nF en serie a los generadores.

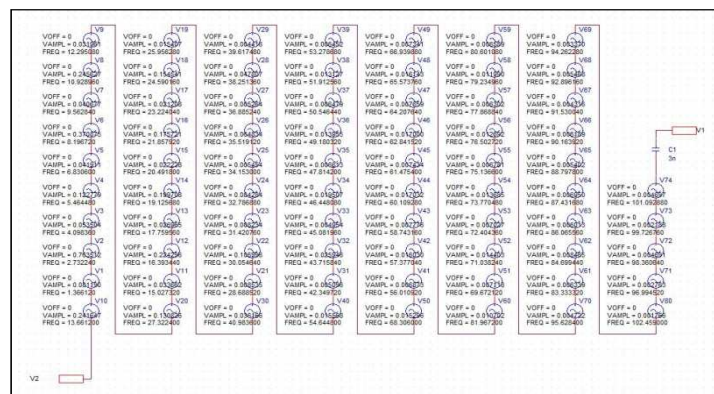


Figura 20: Esquema interno del bloque jerárquico formado por 75 generadores sinusoidales y el condensador de 3nF

Para que la señal sea exactamente igual a la captada por el osciloscopio, es necesario cargar al sistema con una resistencia de $1M\Omega$ simulando la carga que tiene este como impedancia de entrada, así se puede asegurar que se trata de la misma señal.

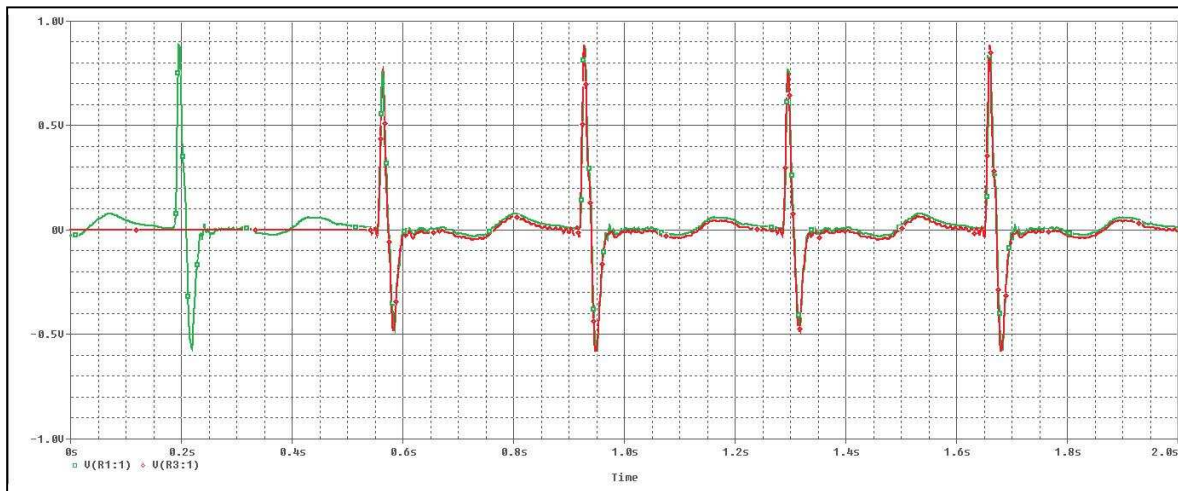


Figura 21: Comparación señales original (verde) y el modelo equivalente eléctrico (roja) superpuestas

Por último, al igual que se ha realizado anteriormente, es necesario que las transformadas de Fourier tanto de la señal original como del modelo eléctrico equivalente sean iguales. En la siguiente figura se puede comprobar que son iguales y por tanto, se puede dar por finalizado el proceso de creación del modelo eléctrico equivalente.

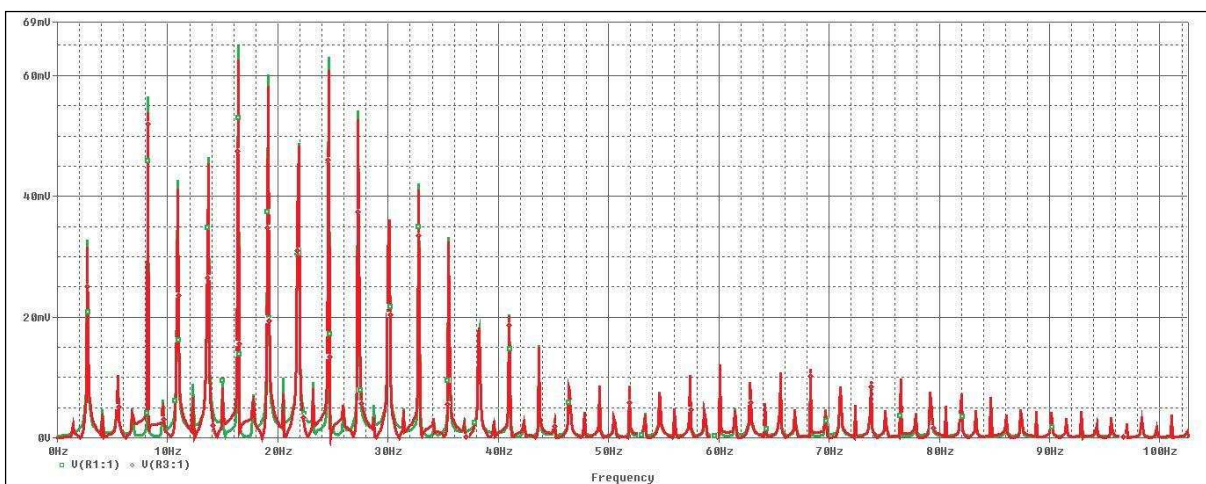


Figura 22: Transformada de Fourier para la señal original (verde) y para el modelo eléctrico equivalente (roja)

2.3 Problemas detectados en la metodología para la obtención de modelos eléctricos

El primer problema, que hemos detectado en la metodología explicada en el apartado anterior, es la falta de precisión que nos ofrece el programa Capture CIS de PSpice, es solamente de 4 decimales. Esta falta de precisión provoca un error en el ruido creciente con el tiempo. En la metodología anterior este problema lo solucionaba introduciendo manualmente las frecuencias de cada armónico con una precisión de 6 decimales, añadiendo estos dos decimales se conseguiría que el problema no creciera con el tiempo pero no se solucionaba por completo.

El principal problema que nos encontramos con esta metodología es la limitación que tiene el programa Capture CIS de PSpice a la hora de obtener el número de armónicos. Este programa solo es capaz de obtener 100 armónicos. Este número es insuficiente para que la reconstrucción de las señales obtenidas de los mecheros o las señales teniendo en cuenta la distancia de seguridad. A partir de este problema se decidió trabajar con otras herramientas.

En principio, se pensó en dos herramientas: Matlab y el lenguaje de programación LabView, al final se decidió trabajar con LabView porque se tenía más conocimiento de esta herramienta. Para solucionar los dos primeros problemas se encontraron dos VI: **Extract Multiple Tone Information** y **Spectral Measurements**.

El Extract Multiple Tone Information nos devuelve la frecuencia amplitud y fase de cada uno de los armónicos que su amplitud exceda de la especificada en la opción de threshold. Éste VI tiene dos opciones para limitar el número de armónicos calculados, una es el threshold que es el límite en amplitud, y otra posibilidad es poner el número máximo de armónicos en la opción max num tones.

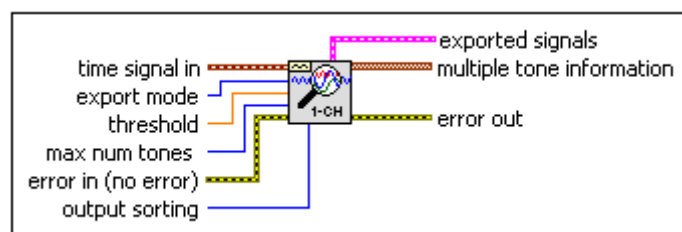


Figura 23: Extract Multiple Tone Information VI

El VI Spectral Measurements funciona muy parecido al Extract Multiple Tone Information, el problema de Spectral Measurements es que calcula todos los armónicos y hay que hacer el filtrado aparte, por el contrario, la ventaja que tiene es la utilización de ventanas. En la siguiente figura se muestra el menú del Spectral Measurement:

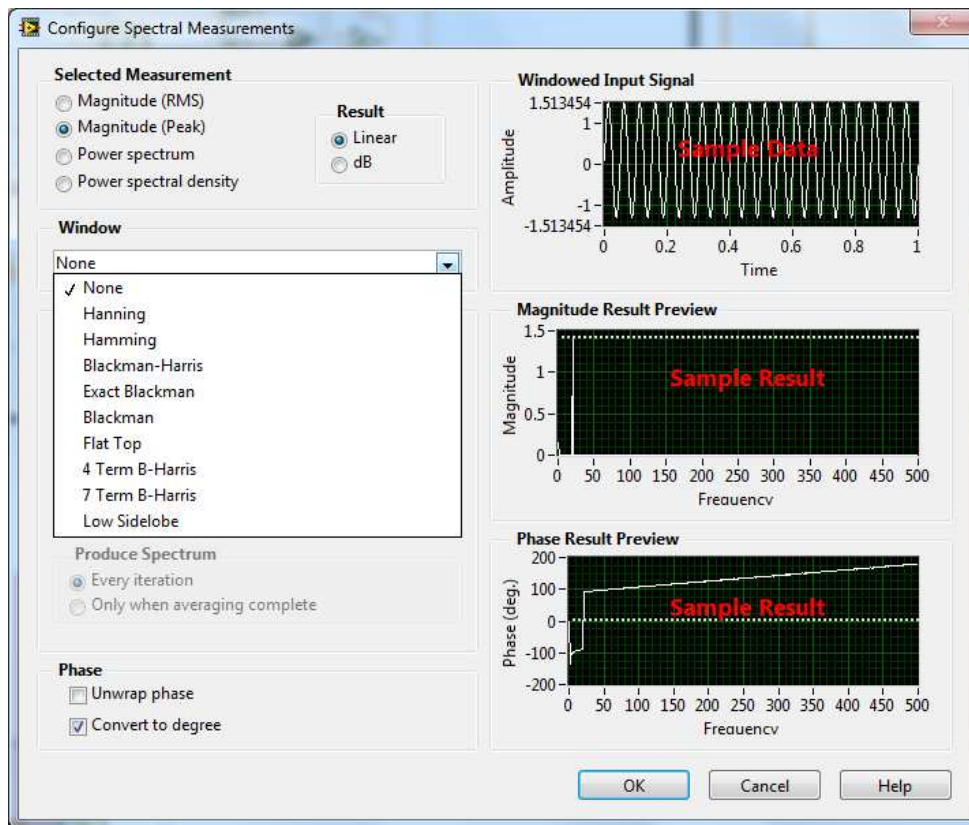


Figura 24: Menú Spectral Measurements

Se ha decidido trabajar con Extract Multiple Tone Information por ser mas sencillo de usar y nos permite filtrar de forma mas sencilla los armónicos que queremos utilizar.

El Extract Multiple Tone Information VI nos soluciona los problemas encontrados en la metodología utilizada anteriormente, éste VI tiene una precisión de 16 decimales, aunque con una precisión de 8 decimales es suficiente. El problema principal también se soluciona, porque el VI es capaz de calcular todos los armónicos de la señal. Además de solucionar estos problemas, tiene otra ventaja más respecto al programa Capture CIS de PSpice, el Pspice calcula como máximo los 100 primeros armónicos y Extract Multiple Tone Information en caso de calcular 100 no calcularía los 100 primeros sino los 100 más significativos.

Además de los problemas detectados por la limitación del programa Capture CIS de PSpice, se ha corregido el valor de la impedancia de entrada efectiva que presenta el osciloscopio Agilent según el modelo de sonda de osciloscopio utilizada. Anteriormente se trabajaron con modelos equivalentes, considerando $1\text{ M}\Omega$ como impedancia de entrada cuando la sonda de prueba 10073C (10:1, 500MHz BW) presenta una impedancia de entrada cuando se conecta al referido osciloscopio de $2.28\text{ M}\Omega//12\text{ pF}$. En este proyecto también se ha tenido que utilizar una nueva sonda, la STACK modelo cp: 241 (100:1, 100MHz BW) cuya impedancia de entrada es $10\text{M}\Omega//4\text{pF}$.

Por último, hay que tener en cuenta que al realizar las capturas en el osciloscopio TDS7054 de la empresa Agilent Technologies©, éste tiene que tener la máxima resolución posible porque de lo contrario las medidas obtenidas del osciloscopios puede que no sean las correctas. Este problema es debido al período de muestreo del osciloscopio.

2.4 Distancia de seguridad

En este proyecto se ha hecho un estudio del efecto que tendría considerar la distancia de seguridad entre vehículos sobre la acumulación de energía. Como no se han podido capturar señales de las diferentes velocidades por las limitaciones del banco de ensayo, y ante la imposibilidad de obtenerlas en el exterior, se opta por modificar las señales obtenidas a partir del banco de ensayo. Esta modificación consiste en aumentar el periodo para que respeten la distancia de seguridad a las diferentes velocidades.

Para saber el periodo de la señal se necesita saber la distancia de seguridad o parada. Se define esta distancia como la distancia total recorrida por un vehículo obligado a detenerse tan rápidamente como le sea posible, medida desde su situación en el momento de aparecer el objeto que motiva la detención. Esta distancia también es la que tiene que guardar un vehículo respecto al vehículo que le precede. Esta distancia recorrida comprende los tiempos de percepción, reacción y frenado. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$D_p = \frac{v \cdot t_p}{3.6} + \frac{v^2}{254 \cdot (f_l + i)}$$

Siendo: D_p = distancia de parada (m).

V = velocidad (km/h).

f_l = coeficiente de rozamiento longitudinal rueda-pavimento.

i = inclinación de la rasante (en tanto por uno).

t_p = tiempo de percepción y reacción (s).

El coeficiente de rozamiento logitudinal para los diferentes valores, se obtendra de la tabla de abajo obtenida al igual que la formula del BOE numero 28 de febero del 2000. Para lo valores intermedios de la velocidades se podra considerar lineal. El valor del tiempo de percepcion y reacion es de 2s.

V (km/h)	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
f_l	0,432	0,41	0,39	0,36	0,34	0,33	0,32	0,30	0,29	0,27	0,263	0,24
		1	0	9	8	4	0	6	1	7		9

Tabla 10: Valores del coeficiente longitudinal

En la siguiente tabla se muestra el valor de la distancia de seguridad para diferentes inclinaciones y velocidades. En el estudio solo se ha tenido en cuenta el valor de la distancia de seguridad de la inclinación 0%.

	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
-8%	40.118	57.604	79.053	107.787	141.355	177.559	219.598	277.647	336.633	422.409	499.446	636.975
-6%	39.156	55.899	76.283	103.193	134.433	168.110	206.979	259.602	313.158	389.058	457.903	575.459
-4%	38.292	54.379	73.828	99.174	128.434	159.965	196.163	244.333	293.438	361.507	423.811	526.247
-2%	37.512	53.015	71.639	95.628	123.185	152.870	186.789	231.246	276.640	338.364	395.331	485.982
0%	36.804	51.784	69.675	92.476	118.553	146.636	178.587	219.904	262.159	318.650	371.182	452.428
2%	36.159	50.667	67.902	89.656	114.436	141.114	171.350	209.979	249.547	301.655	350.447	424.036
4%	35.568	49.650	66.294	87.117	110.752	136.189	164.917	201.222	238.463	286.853	332.449	399.700
6%	35.025	48.719	64.829	84.821	107.437	131.769	159.161	193.438	228.646	273.845	316.680	378.609
8%	34.525	47.865	63.489	82.733	104.437	127.780	153.981	186.474	219.891	262.323	302.750	360.154

Tabla 11: Valores distancia de seguridad.

Una vez obtenidos los valores de la distancia de seguridad, se calcula el tiempo de parada, este tiempo es el periodo que tiene que tener la señal a cada velocidad. Para obtener el tiempo de parada se tiene en cuenta la distancia de cada rueda con respecto del coche 1 metro por eje aproximadamente. La formula para calcular cada tiempo es la siguiente:

$$t_p = (D_p + 2) \cdot \frac{3.6}{v}$$

	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
-8%	3.791	4.291	4.863	5.646	6.451	7.182	7.978	9.152	10.159	11.753	12.894	15.335
-6%	3.704	4.169	4.697	5.410	6.139	6.804	7.523	8.562	9.455	10.829	11.826	13.859
-4%	3.626	4.059	4.550	5.203	5.870	6.479	7.134	8.062	8.863	10.066	10.949	12.678
-2%	3.556	3.961	4.418	5.021	5.633	6.195	6.796	7.634	8.359	9.425	10.217	11.712
0%	3.492	3.872	4.300	4.859	5.425	5.945	6.501	7.262	7.925	8.880	9.596	10.906
2%	3.434	3.792	4.194	4.714	5.240	5.725	6.241	6.938	7.546	8.409	9.063	10.225
4%	3.381	3.719	4.098	4.583	5.074	5.528	6.009	6.651	7.214	7.999	8.600	9.641
6%	3.332	3.652	4.010	4.465	4.925	5.351	5.802	6.396	6.919	7.639	8.195	9.135
8%	3.287	3.590	3.929	4.358	4.790	5.191	5.615	6.168	6.657	7.320	7.836	8.692

Tabla 12: Valores del tiempo de seguridad en función de la velocidad.

2.5 Metodología mejorada para la obtención de modelos eléctricos

2.4.1 LabVIEW

LabVIEW es una herramienta de programación utilizada para crear aplicaciones dirigidas especialmente al entorno de la instrumentación y automatización y el control industrial solamente usando el ordenador personal. Su objetivo es crear aplicaciones en un tiempo de desarrollo mínimo, o al menos en un tiempo inferior al que es necesario invertir en otros entornos de programación.

Para ello, LabVIEW se basa en un lenguaje de programación gráfico, que National Instruments denomina Lenguaje G. Al ser un lenguaje gráfico, la programación se realiza de forma intuitiva, ya que es sencillo conocer y utilizar diferentes componentes para crear programas. Esto indica que, en LabVIEW, los programas no se escriben con texto, sino que el código fuente es un gráfico formado por una serie de bloques, hilos, estructuras, etc. que el compilador se encarga de traducir a lenguaje entendible por la máquina, como en otros entornos de programación.

Un detalle a aclarar es que en LabVIEW los programas reciben el nombre de Instrumentos Virtuales y se denotan con las siglas VI. Para crear VI's en LabVIEW se trabaja de la misma manera que se hace en cualquier otro entorno para crear aplicaciones de ventanas, por una parte se diseña y crea la interfaz de usuario, añadiendo controles como botones, cajas de texto, gráficos,... y a su vez se implementa el código de la aplicación en el diagrama de bloques. Además, para poder utilizar un VI como subVI se debe crear el icono-conector que define la interfaz (las señales) con las que interacciona el VI en cuestión.

Haciendo referencia al ámbito hacia el que se enfoca LabVIEW, la instrumentación, aparte de trabajar en la interfaz de usuario y el diagrama de bloques, en ciertos VI's se debe trabajar en la parte de adquisición y procesamiento de datos, como es el caso que nos ocupa, lo que implica en muchas ocasiones, acceder a hardware de adquisición instalado en el ordenador o hardware externo que se comunica a través de estándares como GPIB, USB o RS-232, así como usar diferentes librerías que proporciona LabVIEW para acceder al hardware (VISA, NIDAQ,...) y otras para procesamiento que realizan operaciones con los datos. No obstante, con las mejoras que cada nueva versión de LabVIEW incorpora se pueden

realizar prácticamente cualquier tipo de aplicación, no teniendo por qué ser, exclusivamente, del ámbito de la instrumentación, sino aplicaciones con acceso a ficheros, Internet o bases de datos.

Por último, comentar que LabVIEW cuenta con dos ventanas principales denominadas ventana de panel y ventana de diagrama. En la ventana de panel se desarrolla el interfaz de usuario o panel frontal, y en la ventana de diagrama se implementa el diagrama de bloques.

2.4.2 Aplicación LabVIEW para la obtención de modelos.

La metodología para la obtención de los modelos eléctricos usada durante este proyecto esta realizada por completo con la herramienta de programación LabView.

La primera parte de las dos metodologías es la misma, esta parte es la forma de capturar las señales que se realiza mediante el uso del osciloscopio TDS7054 de la empresa Agilent Technologies®, con función de guardado de muestras se han obtenido una serie de capturas de formas de onda, en formato de imagen PNG y en formato de tabla de datos de Excel CSV. Aunque se guardan los dos formatos en realidad solo utilizamos el formato Excel CSV, este formato es el que contiene el valor de las muestras en cada instante de tiempo. A partir de este punto, las dos metodologías son totalmente diferentes, en esta nueva metodología se desarrolla por completo con la herramienta LabVIEW. A continuación se muestran el panel de control.

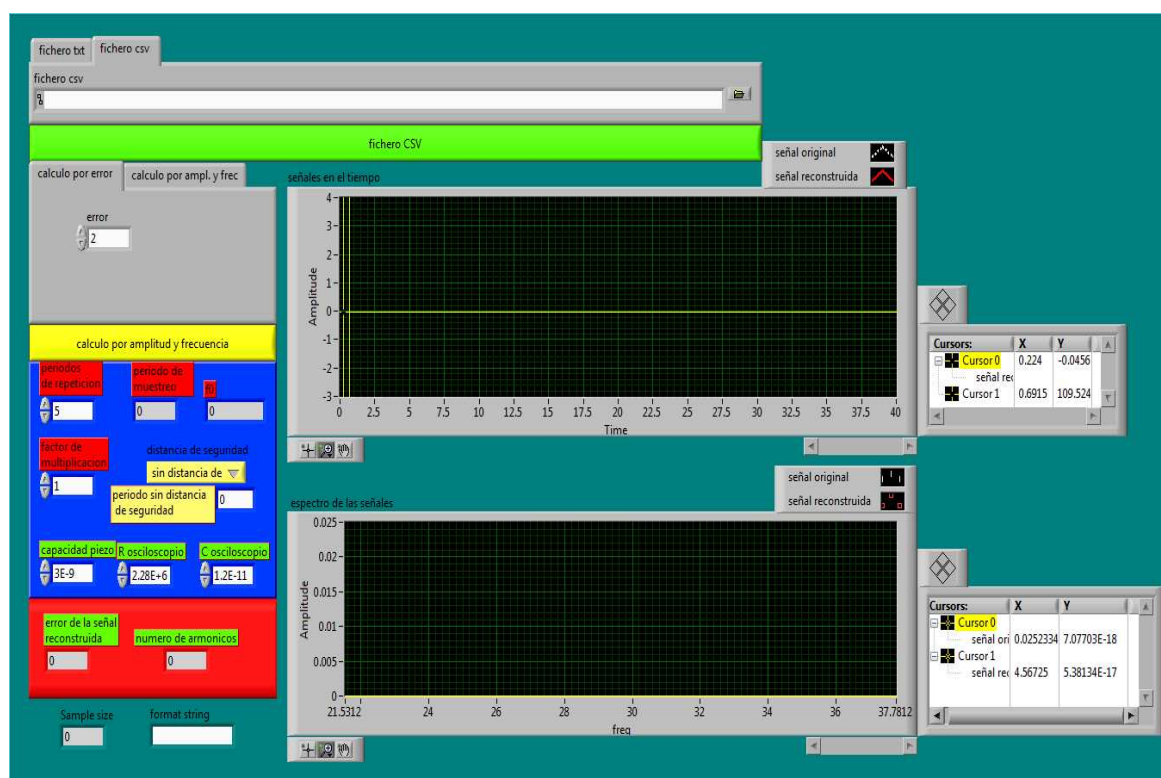


Figura 25: Panel de control aplicación obtener modelo.

El panel de control tiene varias opciones, que el usuario tiene que indicar o puede modificar dependiendo de la señal que quiera reconstruir y obtener el mínimo número de armónicos.

La primera opción, que el usuario debe indicar es si la señal original esta en un fichero CSV o TXT, esta segunda opción se introdujo para poder usar la señales obtenidas con la metodologia anterior. Esta opción se indica pulsando el botón superior, cuando es un fichero CSV el botón esta en verde y en el centro pone fichero CSV. Si la opción es un fichero TXT el botón se pone amarillo y en el centro del boton pone fichero TXT. Además de elegir el formato del fichero, debemos añadir la dirección donde se encuentra el fichero, hay dos pestañas una para añadir la dirección del fichero CSV y otra para el fichero TXT. Hay que tener en cuenta, que en la dirección donde se encuentren los ficheros, que contienen las señales, se guardaran los ficheros con los datos de los armónicos creados por el programa.



Figura 26: Opciones para elegir ficheros en el panel de control

La siguiente opción que el usuario del programa debe elegir es la forma de realizar el cálculo del número de armónicos. Hay dos opciones:

- La primera opción se calcula por el porcentaje de error. El programa obtiene el número mínimo necesario de armónicos para que la señal reconstruida tenga un error en porcentaje menor que el indicado por el usuario.
- En la segunda opción el programa calcula el número de armónicos a través de un filtrado donde hay tres opciones que el usuario indica. Las 3 opciones son el número máximo de tonos, la frecuencia máxima donde se encuentra el tono y por último, la amplitud mínima del tono.

Para elegir una de las dos opciones hay un botón a la izquierda del panel de control. Si se quiere calcular por error, el botón estará en verde y pondrá calcular por error, sí por el contrario, se quiere calcular por filtrado, el botón aparecerá amarillo y pondrá cálculo por amplitud y frecuencia. Encima de este botón hay dos pestañas, donde elegiremos el valor de las variables para cada una de las dos opciones. Como se muestra a continuación.

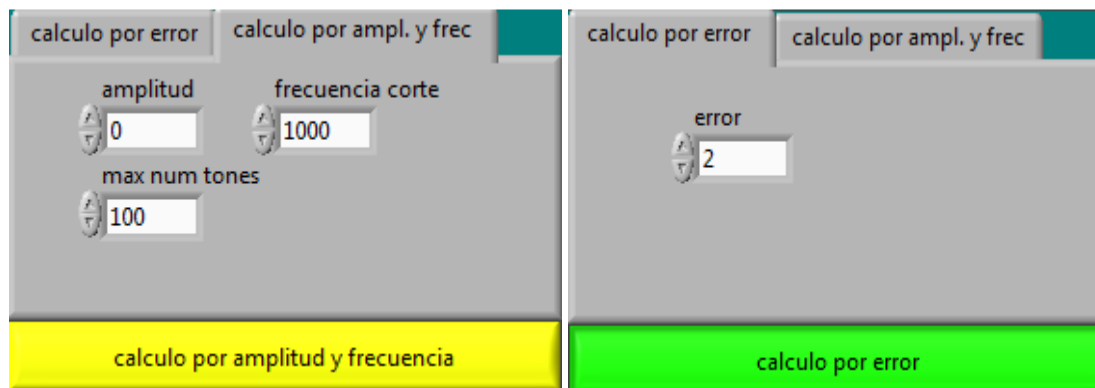


Figura 27: Opciones para elegir el modo de calculo en el panel de control

Las últimas opciones que el usuario puede modificar son:

- El número de periodos que quiere que se repita la señal original por defecto el número de periodos es 5.
- El factor de multiplicación, esta opción nos permite multiplicar por un factor la señal introducida por defecto es 1.
- La distancia de seguridad: con esta opción el usuario puede modificar la señal para que simule una señal producida por vehículos separados por la distancia de seguridad a diferentes velocidades o un tiempo deseado por el usuario. Las 4 velocidades que tiene el menú son 50km/h, 70 km/h, 90 km/h y 120 km/h. Esta opción por defecto es 0, esto quiere decir, que la señal original no se modifica en duración.
- Por último, en este menú tenemos 3 datos que el usuario debe introducir. Estos datos que son: la capacidad del material piezoeléctrico, la capacidad del osciloscopio y la resistencia del osciloscopio. Estos 3 datos son muy importantes porque son necesarios para el cálculo del modelo eléctrico equivalente. Por defecto son 3 nF, 12 pF y 2.28 MΩ respectivamente.

Por último, en este menú el programa muestra dos datos al usuario, el periodo de muestreo de la señal y la frecuencia fundamental de la señal f_0 .



Figura 28: Menú del panel de control

En la parte izquierda, debajo de menú comentado anteriormente, aparecen dos datos que proporciona el programa después de realiza el calculo de los armónicos. Los datos son el error que existe entre la señal reconstruida y la señal original y el número de armónicos calculado.

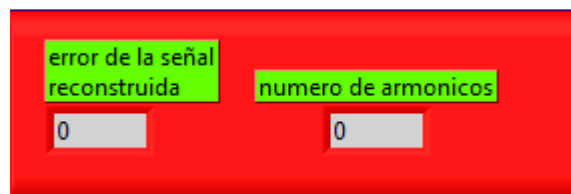


Figura 29: Datos mostrado en el panel de control

Por último, en el panel de control aparecen dos gráficos. En el de arriba se muestra la señal original en blanco y la señal reconstruida en rojo y en el gráfico de abajo se muestra los espectros de la señal original en blanco y el de la señal reconstruida en rojo.

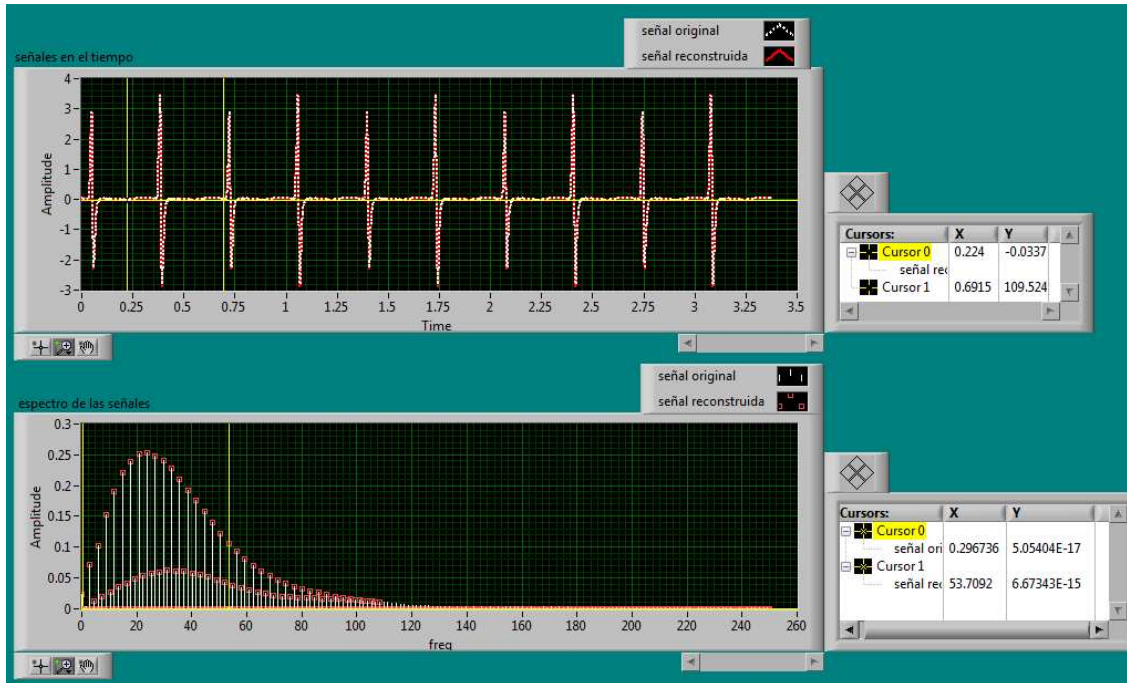


Figura 30: Gráficos del panel de control.

Después de explicar el panel de control se va a realizar un breve resumen de la aplicación realizada en LabVIEW. El programa consta de 3 partes:

1. La primera parte que tiene el programa es la creación de la señal a partir del fichero seleccionado y las opciones (periodos, factor de multiplicación y distancia de seguridad) elegidas por el usuario.
2. La segunda parte de la que consta el programa es el cálculo del número de armónicos. En esta parte se puede hacer de dos maneras, solo se hace de una forma cada vez que será la elegida por el usuario en el panel de control. Las dos posibilidades son el cálculo por error o el cálculo por filtrado.
3. En la última parte el programa guarda la frecuencia, fase y amplitud de los armónicos calculados. A partir de los armónicos calculados realiza el cálculo de los componentes del modelo eléctrico y los guarda en varios ficheros. Y por último, en esta parte muestra las señales originales y reconstruidas y sus respectivos espectros.

Para crear la señal original es necesario guardar los datos que contiene el fichero seleccionado en un array. Esta parte se hace de dos formas dependiendo de si el fichero con el que se trabaja es CSV o TXT. Si el fichero que selecciona el usuario es un CSV, sería el caso false, en este caso el fichero se lee con el VI “Read From Spreadsheet File” indicándole que el formato de los datos es Double con una precisión de 6 decimales y las columnas están separadas por comas. La precisión es de 6 decimales porque es la precisión que tiene el osciloscopio. Este VI ya nos devuelve un array con los datos pero las dos primeras filas necesitamos borrarlas porque contiene datos que no nos interesan, esto se realiza con el VI “delete from array”.

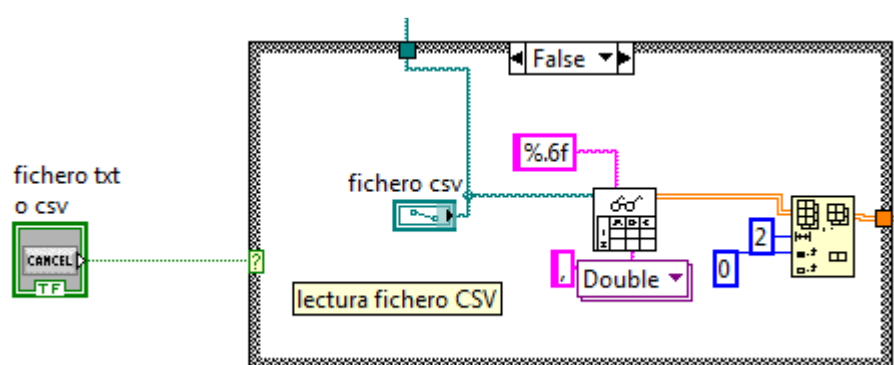


Figura 31: Lectura fichero CSV

Si el fichero con el que se va a trabajar es un fichero TXT, sería el caso true. Este fichero se lee con el VI “Read from Text File Function”. Este VI nos devuelve el fichero pero en forma de texto, para poder trabajar con los datos leídos necesitamos convertirlos en un array, esto lo conseguimos con el VI “Spreadsheet String To Array” indicándole que el formato de los datos es “string”.

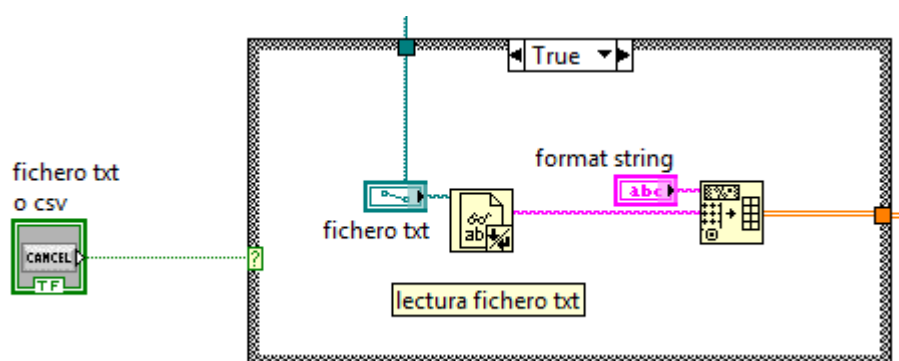


Figura 32: Lectura fichero TXT

En el siguiente bloque se va a crear la señal original con la que se va a trabajar. Este bloque tiene varias partes. En una de las partes se calcula el periodo muestreo restando el valor del tiempo de las dos primeras muestras. Para obtener el valor de un elemento de un array se utiliza “index array” indicando el número de fila y columna del elemento. El dato obtenido se muestra en el panel de control a través de un indicador.

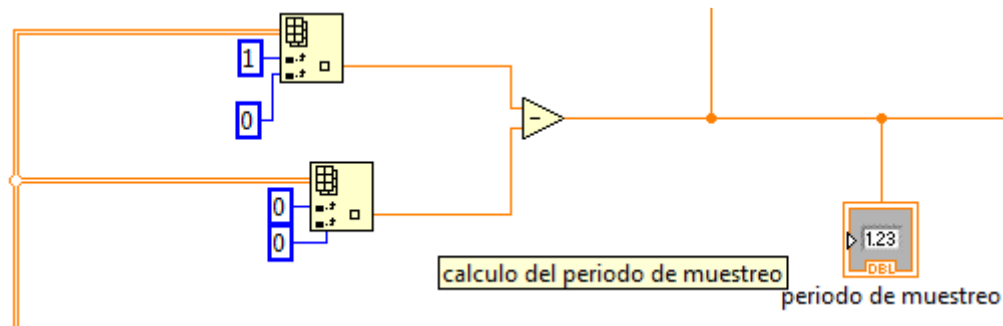


Figura 33: Cálculo del periodo de muestreo

En la siguiente parte de este bloque, añade si es necesario el número de 0 necesario para que la señal cumpla la distancia de seguridad. Para conseguir esto, calculamos el tamaño de la señal que contiene el array, donde se guardaron los datos del fichero leído. Por otro lado, restamos el periodo de muestreo a la distancia de seguridad para que al añadir las muestras añadida el número correcto. La distancia de seguridad se selecciona en la estructura Case, está tiene 5 opciones 0 como se ve en la gráfica donde el valor de seguridad es 0 o uno introducido por el usuario. Si el valor introducido por el usuario es menor que el de la señal original el valor del período será el de la señal original. Los otros 4 casos son 50, 70, 90 y 120 cuyo valor de período es 3.872, 4.859, 5.945 y 7.925 respectivamente, hay que tener en cuenta que el programa solo modifica el periodo de la señal para que cumpla la distancia de seguridad, no la distancia entre los pulsos de los ejes. Esta distancia debe estar ya modificada en el fichero con el que trabaja el programa. Tras obtener el valor del periodo de la señal, que el usuario quiere, se le restan el valor de la señal original que contenía el fichero seleccionado, con esto se halla el tiempo que hay que añadir a la señal, este tiempo lo dividimos por el período de muestreo para hallar el número de 0 que hay que añadir. Por último, añadimos los 0 necesarios al array que contiene los datos para crear la señal. Este último array, es de una sola dimensión donde solo contiene el valor de la amplitud de la señal.

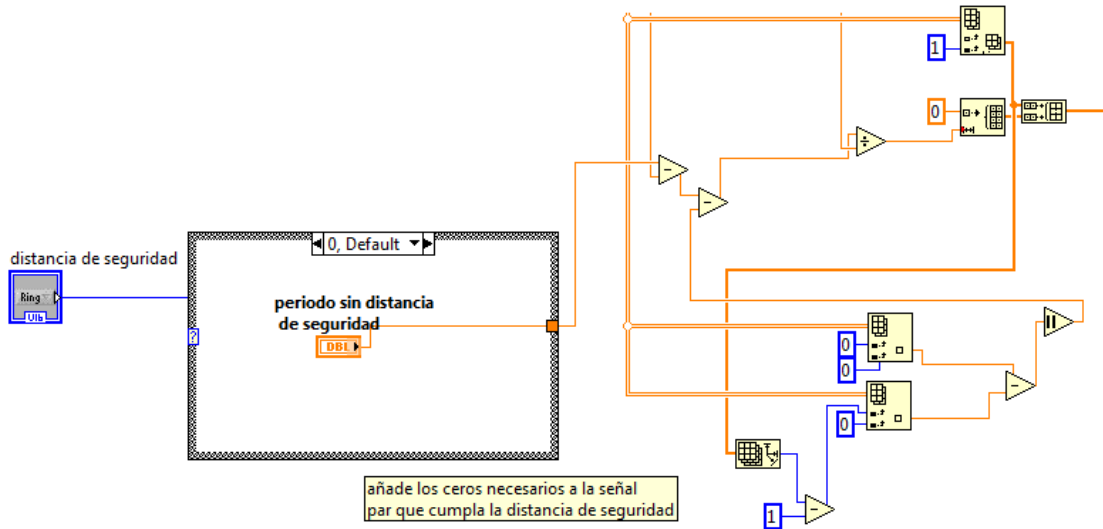


Figura 34: Calculo de las muestras que hay que añadir.

En la última parte del primer bloque, es donde se crea la señal original con la que vamos a trabajar. En la estructura while multiplicamos por un factor seleccionado por el usuario, todas las muestras del array donde está guardada la señal y lo introducimos en un array que ha sido inicializado a 0. Este bucle se repetirá el número de veces como de períodos quiera el usuario que tenga. Para que el valor del array, que se encuentra en el interior de la estructura, se utilicen los denominados “Shift Register” que se encargan de pasar valores de una iteración a otra. Consta de dos terminales, situados en los bordes laterales de la estructura. El terminal izquierdo almacena el valor obtenido en la iteración anterior. El terminal derecho guardará el dato correspondiente a la iteración en ejecución. Cuando se termina la ejecución del bucle while, el array contiene todas las muestras de la señal de todos los períodos de la señal. Después de calcular todas las muestras se calcula la frecuencia fundamental, para ello obtenemos el número de muestras de la señal con “array size” y se multiplica por el período de muestreo para obtener el tiempo que dura la señal. Una vez obtenido el tiempo se divide por el número de períodos que contiene la señal para obtener la duración de un período, y se halla su inverso, que será f_0 o frecuencia fundamental. Por último en este bloque se crea la señal con “build waveform”, para crear la señal se introduce los valores guardados en el array y se le indica el intervalo de tiempo que hay entre cada valor, el período de muestreo.

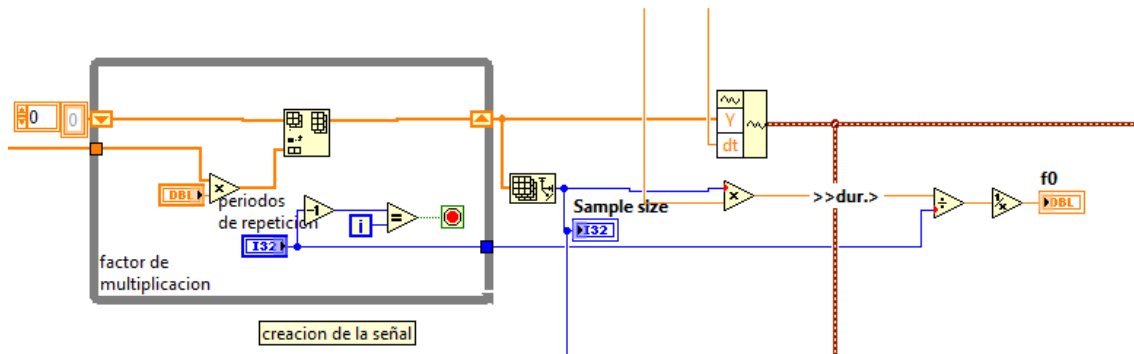


Figura 35: Creación de la señal

En la siguiente parte del programa se calcula el número de armónicos que hay que calcular si se ha elegido la opción de cálculo por error, el programa trabajara en el caso TRUE de las estructuras. Para realizar este cálculo comparamos la señal original que se ha creado con la señal obtenida con “Extract multiple tones”. Se introduce las dos señales en el VI “waveform min max” que sirve para obtener el máximo y el mínimo de cada señal. Después de haber obtenido el máximo y mínimo de cada señal se restan para obtener el valor de pico a pico de cada señal. Cuando se han obtenido los dos valores, se resta el valor de la señal original al valor de la señal reconstruida y el resultado se divide por el valor de la señal original. En este punto, ya se tiene el error que hay en esos momentos entre la señal original y la señal reconstruida, para poder hacer la comparación con el error que indicó el usuario, el programa se queda con el valor absoluto del error y se multiplica por 100 para pasarlo a tanto por ciento. Una vez calculado el tanto por ciento se compara el resultado con el valor del error que introdujo el usuario. Para obtener el número de armónicos necesario para que la señal reconstruida tenga un error menor al indicado, se realiza calculando un número muy alto de armónicos, este número va disminuyendo hasta que el error sea inferior al indicado por el usuario, se empieza de mas armónicos a menos para que la forma de la señal sea lo más parecida posible a la señal original. Se empieza calculando 10000 armónicos, este número es tan alto para que sirva para cualquier señal. Si el error es mas bajo que el indicado se resta 5000, si es as alto se le suma 5000 y se pasa al caso 1000. En este caso si el error es más bajo se resta 1000 y si es más alto se suma 1000 y pasa al caso 500. En este caso si el error es más bajo se resta 500 y si es más alto se suma 500 y pasa al caso 100. En este caso si el error es más bajo se resta 100 y si es más alto se suma 100 y pasa al caso 10. En este caso si el error es más bajo se resta 10 y si es más alto se suma 10 y pasa al caso 1. El caso 1 es el último caso necesario, en este caso se resta 1 si el error es mayor y si el error es menor se sale del bucle while. El valor obtenido pasa a otra estructura case también en el case TRUE donde se

le suma 1 porque el bucle while anterior se ha realizado una vez más de lo necesario. El otro valor que hay dentro de la estructura, es el valor de amplitud que se introducirá en un “Extract multiple Tones”, que será 0. Un ejemplo para que se entienda mejor, si el numero de armónicos obtenido hubiera sido 978 las cuentas hubieran sido: 10000, 5000, 0, 5000, 4000, 3000, 2000, 1000, 0, 1000, 500, 1000, 900, 1000, 990, 980, 970, 980, 979, 978, 977 y 978.

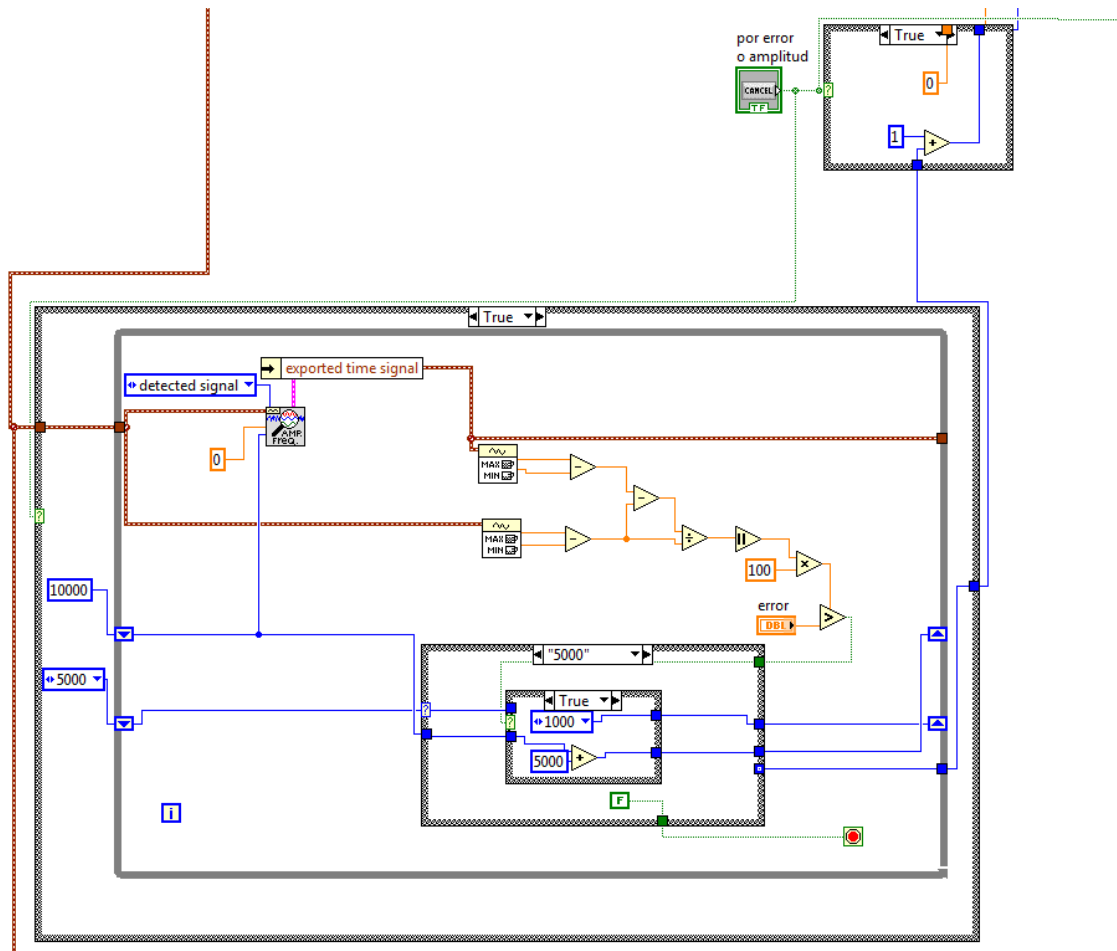


Figura 36: Calculo del número de armónicos por error. Case TRUE

El usuario a elegido la opción del filtrado para el número de armónicos el programa trabaja en case False. En este caso el programa es más sencillo, solo lee la amplitud y el número de armónicos que se introducirán en el “Extract multiple Tones”.

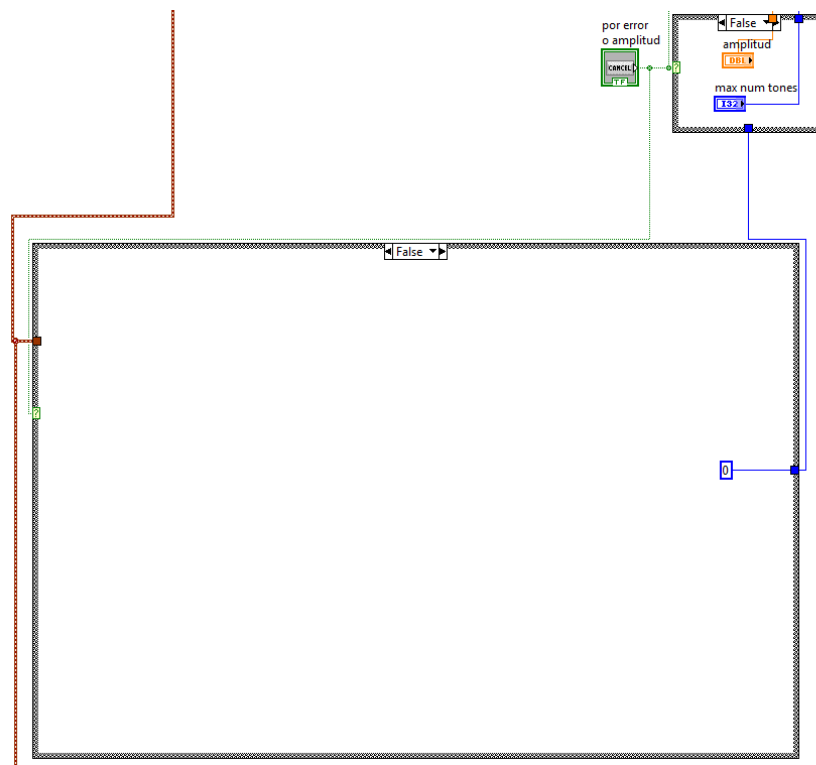


Figura 37: calculo del número de armónicos por filtrado. Case False

En el último bloque de la segunda parte del programa, se calculan los armónicos definitivos con el “Extract multiple Tones” en el caso de que el usuario hubiera elegido cálculo por error, case TRUE, en ese caso en la estructura no se hace nada. Si la opción elegido por el usuario es por filtrado, sería el case False de la estructura. Una vez calculado los armónicos por el “Extract multiple Tones” se realiza un filtrado por frecuencia, todos los armónicos por encima de una frecuencia indicada por el usuario son eliminados. Para realizar este filtrado tenemos dos estructuras dentro del caso False, una estructura while y una estructura case, esta última dentro de la estructura while. En la estructura while se compara la frecuencias de los armónicos hasta que una supere la frecuencia de corte indicada por el usuario o se hayan comprobado todos los armónicos. En la estructura case si la frecuencia del armónico no ha superado la frecuencia de corte, case False, se almacena en tres arrays que contienen la frecuencia amplitud y fase de los armónicos. Cuando se ha superado la frecuencia de corte o se han comprobado todos los armónicos pasaría al case TRUE, en este caso lo único que se obtienen son los datos guardados en cada array para poder seguir trabajando con ellos.

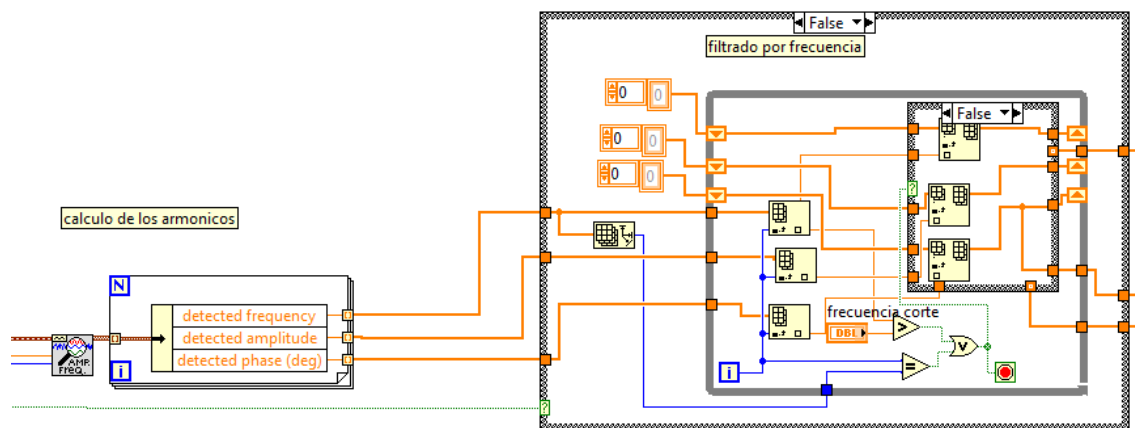


Figura 38: calculo de armónicos definitivo y filtrado por frecuencia.

En la tercera parte del programa es donde se trabaja con los armónicos obtenidos. En el primer bloque creamos el nombre con el que se guardarán los diferentes archivos. Todos los archivos se guardarán en el mismo directorio del fichero original, con formato txt y el nombre es igual pero añadiendo `_frec` si es frecuencia, la frecuencia es igual para los datos medidos y reales. Para indicar que son fases se añade `_phase` para guardar los datos medidos y `_phase real` para guardar los datos calculados. Para indicar la amplitud medida se añade `_ampl` y `_modulo real` para los datos calculados. Por último, hay dos archivos donde se guardarán todos los datos juntos, para los datos medidos se añade `_frec mod y phase medidos` y para los datos calculados se añade `_frec mod y phase reales`. Se guardan los datos juntos y separados para poder trabajar después con los datos por separado si fuera necesario.

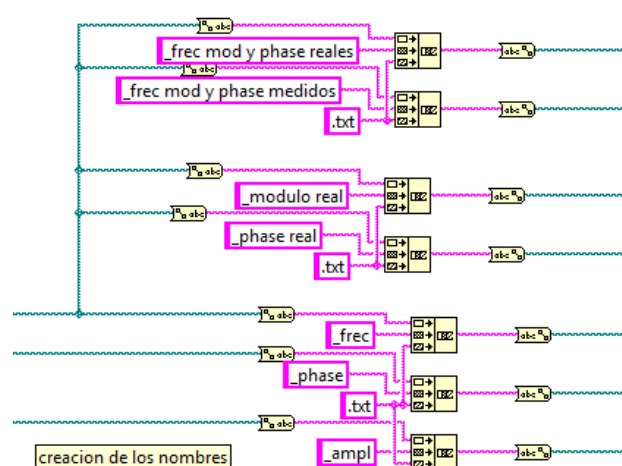


Figura 39: Creación de los nombres de los archivos.

Una vez obtenidos los nombres se procede a guardar los datos medidos en 4 ficheros de texto. De arriba hacia abajo en la imagen, se guardan la frecuencia, amplitud, fase medidos por separado y en el último se guardan los tres datos juntos. Para guardar los tres primeros utilizamos el VI Write To Spreadsheet File, introduciendo el nombre creado en el bloque anterior en cada VI. Los datos obtenidos del cálculo de los armónicos los añadimos en cada VI en la entrada de datos de 1D, esto quiere decir que son datos de 1 dimensión. Se le indica el formato %8f, los datos son números y guarda hasta 8 decimales. Por último se le indica que ponga los datos en columnas poniendo true en su entrada transpose. Para guardar todos los datos juntos primero se construye un array con los tres datos, este array es de dos dimensiones. La única diferencia que hay entre guardar los datos conjuntos con los individuales es la forma en que introducimos los datos, en este caso los datos los introducimos en la entrada 2D.

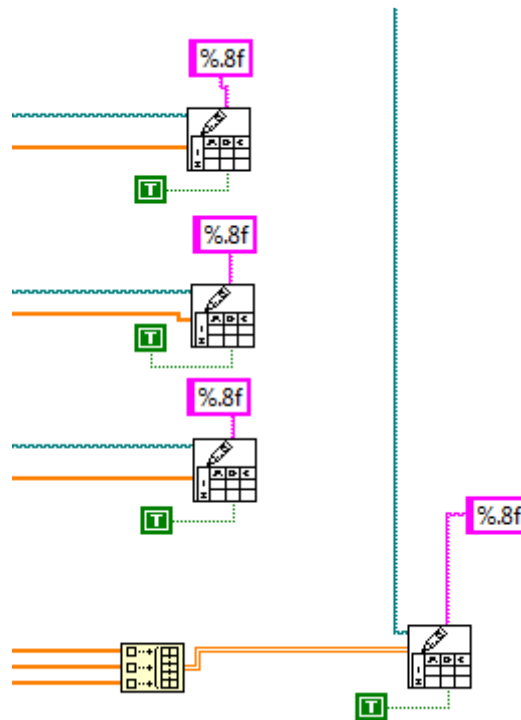


Figura 40: Guardar datos medidos.

En el siguiente bloque se calculan la fase y módulo reales de cada armónico. Para mostrar información al usuario se calcula el tamaño del array de frecuencia y se muestra en el panel de control a través de un indicador que se llama número de armónicos. El cálculo de la fase y modulo se realiza dentro de un bucle while, este bucle se ejecutara una vez por cada armónico. Los cálculos que se realizan dentro de bucle while son los siguientes:

- Fase medida en rad: se multiplica por 2π la fase medida y se divide entre 360

$$fase\ med(rad) = fase\ med(grad) \cdot \frac{2\pi}{360}$$

- Generador medido: se calcula el coseno y el seno de la fase en rad con las funciones cosine y sine respectivamente. El resultado obtenido en cada caso se multiplica por la amplitud. Para obtener el número complejo el programa utiliza “Re/Im to complex”, esta función tiene dos entradas una Re donde se introduce el valor real del número complejo, en este caso el obtenido de multiplicar el coseno de la fase por la amplitud. La otra entrada de la función es Im donde se introduce el valor imaginario de número complejo, en este caso el obtenido al multiplicar el seno de la fase por la amplitud. La función devuelve a su salida un número complejo de la siguiente forma $Re + Im\ j$.

$$generador\ medido = [\cos(fase_{rad}) \cdot ampli] + [\sin(fase_{rad}) \cdot ampli] \cdot j$$

- Impedancia del piezoeléctrico: esta impedancia es la producida por la capacidad del piezoeléctrico. El valor de esta capacidad es introducido por el usuario. Para hallar esta impedancia se divide -1 entre la multiplicación de 2π por la frecuencia y por el valor de la capacidad del piezoeléctrico. Como la impedancia es imaginaria pura introducimos en la entrada Im de “Re/Im to complex” el valor obtenido y 0 en la entrada Re.

$$imp = -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot frec \cdot c_{piezo}}$$

- Impedancia de carga: esta impedancia depende de los valores de la capacidad y resistencia del osciloscopio, introducidos por el usuario. Esta impedancia es un número complejo, para calcular este número se utiliza otra vez la función “Re/Im to complex”. La entrada Re es la división de 1 entre la resistencia del osciloscopio introducido por el usuario. En la entrada Im introducimos el valor obtenido de multiplicar 2π por la frecuencia y por la capacidad del osciloscopio introducido por el

usuario. Por ultimo se divide 1 entre el numero complejo obtenido para hallar el valor de la impedancia de carga.

$$imp_{carga} = \frac{1}{\frac{1}{R_{osc}} + 2 \cdot \pi \cdot freq \cdot c_{osc} \cdot j}$$

- Generador real: para hallar el valor del generador usamos la formula del divisor de tensión formado por la impedancia del piezoeléctrico y por la impedancia de carga calculados.

$$generador\ real = gen_{med} \cdot \frac{imp + imp_{carga}}{imp_{carga}}$$

En este punto tenemos el valor del generador real en forma compleja, para obtener el módulo y la fase de este número. Para obtener el módulo y la fase del número se utiliza la función “complex to polar”, esta función tiene una entrada donde se introduce un número complejo y devuelve en una entrada el módulo y en otra la fase en radianes. Para poder utilizar la fase en el orcad se pasa la fase a grados multiplicando por 360 y dividiendo entre 2π .

Los datos obtenidos de modulo y fase se guardan en dos array que están dentro de una estructura case en el caso False, esta estructura siempre esta en el caso False salvo en la iteración del bucle while que pasa al caso True. En esté caso lo único que hace el programa es leer los datos guardados en los arrays. Por último en este bloque se guardan los datos en diferentes archivos de la misma manera que se hizo con los datos medidos.

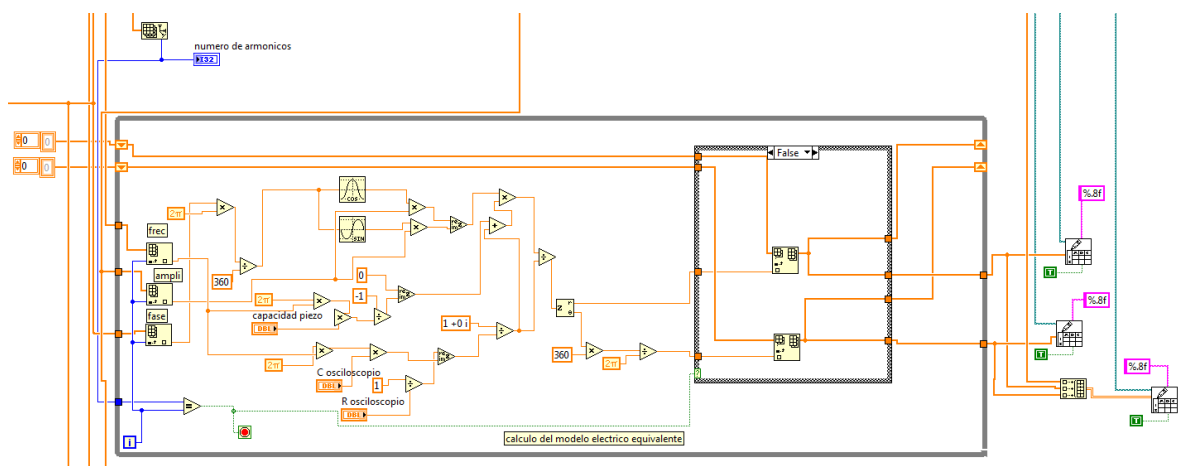


Figura 41: Cálculo de los parámetros del modelo equivalente.

El último bloque de la tercera parte muestra la comparación de la señal original y reconstruida. Lo primero que se realiza en esta parte es la reconstrucción de la señal a partir de los armónicos medidos. Para reconstruir la señal se utiliza el VI “Sine Waveform”, este VI se encuentra dentro de una estructura for que se realizará el mismo número de veces como armónicos se han obtenido. Sine Waveform tiene 5 entradas que utiliza el programa. Tres son para introducir los datos de cada armónico, frecuencia, amplitud y fase. En otra entrada se introducen los datos de muestreo, periodo de muestreo y el número de muestras. La última entrada esta a true para resetear la señal cada vez que lo utiliza. En cada iteración del bucle for se crea un tono, este tono se suma a los ya calculados hasta calcular todos y haber realizado la suma de todos los tonos. La suma de todos los tonos proporciona la señal reconstruida, esta señal junto con la señal original se muestran en un mismo grafico. Las dos señales también pasan por el VI “spectral measurements” que calcula el espectro de las dos señales y el resultado se muestra en otro gráfico. Por ultimo para dar información al usuario se calcula el error que hay entre la señal reconstruida y la original y se muestra en un indicador. El error se calcula de la misma manera que se cálculo en el bloque para obtener el número de armónicos obtenidos por el calculo por error.

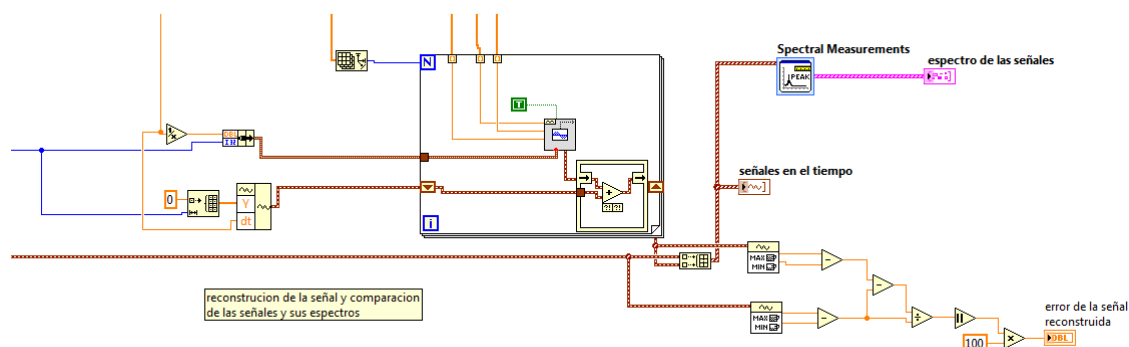


Figura 42: Muestra de las señales, sus espectros y error definitivo

2.6 Modelo equivalente para N piezoeléctricos

Para poder realizar el estudio de acumulación de energía eléctrica es necesario el uso de más de un cable piezoeléctrico con el objetivo de generar mayor cantidad de potencia disponible. Estos N elementos colocados consecutivamente bajo un vial estarán a una distancia $d=1,6$ cm o $d= 11$ cm equidistante entre sí, dependiendo si es un cable o un mechero. Como el estudio de acumulación se va a realizar en el entorno OrCAD® esta distancia se traduce en un desfase temporal entre impactos.

Por tanto, teniendo el modelo equivalente del cable piezoeléctrico se puede crear el número de cables necesario para realizar el estudio modificando únicamente el valor de desfase “ T_d ” de los generadores.

Para calcular el valor de este desfase se va a considerar que el radio de la plataforma es mucho mayor que d ($r \gg d$), por tanto el arco recorrido es una distancia muy aproximada a la distancia entre cables definida como d .

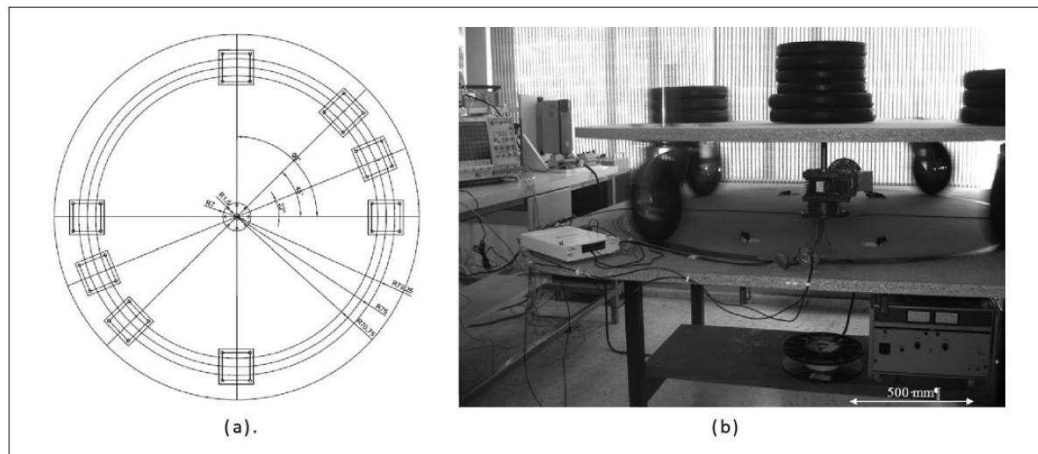


Figura 43: (a) Planta de la plataforma giratoria del banco de ensayos. (b) Ensayo en realización

Sabiendo la velocidad de giro del banco de ensayos, se puede relacionar ésta con la velocidad angular ω y el radio de la plataforma r y así conocer el valor de desfase T_d .

$$v = \omega \cdot r \rightarrow T_d = \frac{d}{v}$$

Este valor de desfase T_d se introduce, en cada uno de los generadores de cada bloque jerárquico (cada cable o mechero) en el parámetro TD que puede observarse en la figura 15 en donde aparecían los parámetros de un generador v_{sin} , multiplicado por la posición en la que está colocado. Así se consigue retrasar cada cable con respecto al anterior ampliando el modelo eléctrico equivalente de un cable para N cables.

Una vez conocido el proceso para la creación de un modelo eléctrico equivalente es el momento de explicar donde aparecen estos modelos y donde pueden ser asociados para lograr una mayor tensión alcanzada en el generador.

Al crear un proyecto nuevo aparece un esquemático en el que poder realizar los esquemas electrónicos que se necesiten, el problema de este esquemático es que para el proceso de asociación de un alto número de cables piezoeléctricos este se hace insuficiente y es necesario utilizar más esquemáticos. La solución encontrada es la de colocar bloques jerárquicos independientes en el esquemático distribuyendo los cables piezoeléctricos dentro de estos. Así, en cada bloque aparecerán 16 cables piezoeléctricos.

El proceso es sencillo.

- 1) Creación de un proyecto de OrCAD PSpice®.
- 2) Creación de un bloque jerárquico denominado 16cables_0. El proceso de creación de un bloque está descrito anteriormente. De todos modos es sencillo:
 - 2.1) Seleccionar la opción del capture: “Place hierarchical block”.
 - 2.2) Asignar un nombre, el mismo, en los campos “reference” e “Implementation name”.
 - 2.3) Seleccionar la implementación de tipo: “Schematic view”.
 - 2.4) Dejar en blanco el campo “Path and filename”.
- 3) Asignación de pines al bloque jerárquico creado.
 - 3.1) Asignar un nombre en el campo “name”.
 - 3.2) Elegir como “Passive” el tipo de pin utilizado.
 - 3.3) Fijar a “Scalar” el ancho del pin dentro del campo “Width”.

4) Creación de los 16 modelos eléctricos equivalentes dentro del esquemático creado en el paso anterior.

4.1) Pulsar botón derecho sobre el bloque creado en el paso 2 y seleccionar “Descend Hierarchycal”. Aparecerá el esquemático correspondiente al bloque. Verificar que aparecen los pines creados.

4.2) En dicho esquemático se crea un modelo eléctrico equivalente siguiendo los pasos descritos anteriormente.

4.3) Al cable se le asigna el retraso correspondiente. Este retraso se coloca en el campo TD de cada uno de los generadores V_{SIN} . (El primer cable empieza con $TD=0$).

4.4) En bornes del piezoeléctrico se coloca la topología rectificadora elegida.

4.5) Se repite desde el paso 4.2 hasta la creación de 16 modelos eléctricos equivalentes.

5) Una vez creado los 16 modelos se vuelve al paso 2 para crear el bloque denominado 16cables_1. Este paso se repetirá las veces que sean necesarias hasta disponer del número total de cables deseado.

Como se puede comprobar, se trata de un proceso muy repetitivo y sencillo en el que hay que estar creando bloques jerárquicos continuamente y cambiando los nombres ya que no pueden existir dos bloques con nombre similar. Esto tiene fácil solución dándole un valor numérico creciente a cada uno de los bloques, por ejemplo: piezo1, piezo2, piezo3, etc.

Además, hay que aprovechar que el modelo del cable es igual para todos los cables y por tanto tener en cuenta que lo único que varía es el valor del desfase temporal TD.

En definitiva, de esta manera es posible crear gran cantidad de “cables” de manera ordenada. Además si se quiere acceder a cualquiera de los modelos es sencillo, ya que cada vez que se crea un bloque jerárquico se crea a su vez un directorio nuevo que lleva el nombre asignado a dicho bloque, en este caso cada bloque jerárquico es un modelo o cable independiente por lo que existe una carpeta por cada cable creado.

Cada una de estas carpetas depende, así como el esquemático principal, de una carpeta raíz denominada root (en este caso .\26_90.dsn) como puede observarse en la figura. Este es el directorio donde se puede acceder a cada bloque jerárquico creado.

La siguiente figura representa la ventana Capture OrCAD®. Se trata de la asociación en paralelo de ochenta modelos eléctricos o cables. Esta asociación se realiza en el esquemático principal (SCHEMATIC1) distribuyendo los ochenta cables en cinco bloques jerárquicos. En el interior de cada uno de estos bloques aparecen 16 cables, en la figura aparece el bloque denominado 16cables_0, con su topología rectificadora correspondiente en este caso en puente de diodos.

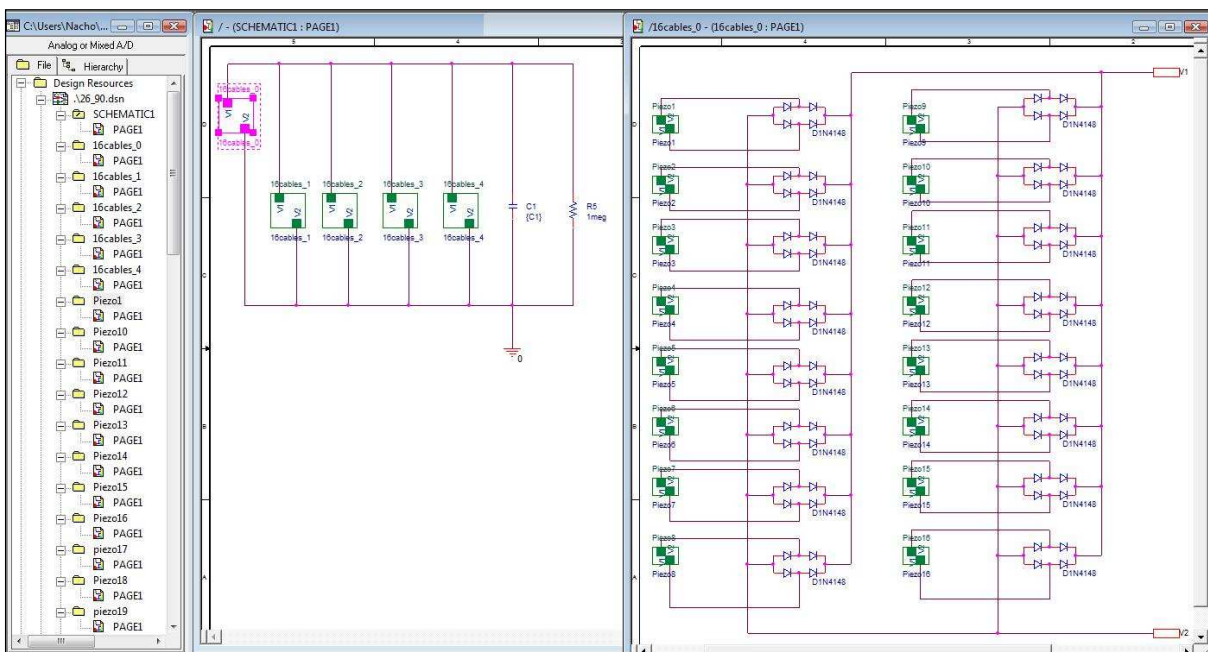


Figura 44: Directorio correspondiente a la asociación paralelo de ochenta cables

2.7 Comparación de las Metodologías

Para cerrar este capítulo se va a calcular la mejora obtenida con los modelos actuales al haber corregido el valor de la impedancia efectiva de entrada del osciloscopio en la creación de los nuevos modelos. Para comprobar resultados los modelos nuevos se han calculado con el mismo número de armónicos con el que estaban calculados, 75 armónicos en todos los casos excepto en el caso del cable al aire sin enterrar que se han utilizado 100 armónicos. Se van a hacer dos comparaciones, la primera de ellas se comparará el error que se obtiene con la nueva metodología y el error que se tenía teniendo en cuenta las señales reconstruidas con una resistencia de carga de $1\text{M}\Omega$. En la siguiente tabla se observa esta primera comparación.

cable	Vmedida (Vpp)	V obtenida(Vpp)	error (%)	ruido (Vpp)
aire antiguo	42.188	43.469	3.03640846	1.9923
aire nuevo	42.188	43.281	2.59078411	1.4903
enterrado antiguo	6.252	6.3922	2.24248241	0.043653
enterrado nuevo	6.252	6.344	1.47152911	0.0365
amplificación mecánica antiguo	3.3828	3.1983	5.45406172	0.022891
amplificación mecánica nuevo	3.3828	3.3974	0.43159513	0.019875
sin amplificación mecánica antiguo	1.463	1.4761	0.89542037	0.01678
sin amplificación mecánica nuevo	1.463	1.4764	0.91592618	0.016517

Tabla 13: Comparación resultados obtenidos y medidos

Como se puede comprobar a la vista de los resultados con los nuevos modelos el error es un poco menor que en los modelos antiguos, también el ruido es menor con la metodología nueva en diferencia con la antigua. Estos resultados no son reales en las medidas de los modelos antiguos, esto es debido a que la impedancia de carga no es de $1\text{M}\Omega$ sino un paralelo de una resistencia de $2.28\text{M}\Omega$ y una capacidad de 12 pF. En la siguiente tabla se obtiene el error sobre las señales simuladas obtenidas si a los modelos antiguos se le carga con el valor correcto de la impedancia de entrada equivalente para sonda 10073C.

cable	Vmedida (Vpp)	V obtenida(Vpp)	error (%)	ruido (Vpp)
aire antiguo	42.188	58.458	38.5654689	2.141
aire nuevo	42.188	43.281	2.59078411	1.4903
enterrado antiguo	6.252	9.866	57.8055022	0.045921
enterrado nuevo	6.252	6.344	1.47152911	0.0365
amplificacion mecanica antiguo	3.3828	4.815	42.3377084	0.164
amplificacion mecanica nuevo	3.3828	3.3974	0.43159513	0.019875
sin amplificacion mecanica antiguo	1.463	2.3817	62.7956254	0.065123
sin amplificacion mecanica nuevo	1.463	1.4764	0.91592618	0.016517

Tabla 14: Comparación resultados obtenidos y medido reales.

Como se puede comprobar en los resultados de la tabla anterior el error real de los modelos antiguos es un error muy grande y el ruido también aumenta pero aumenta en menos proporción que el error. Este error que contiene cada modelo se ha transmitido en todos los modelos antiguos. Por tanto, al haber subsanado en los modelos el efecto de la impedancia de medida, las conclusiones sobre aprovechamiento energético que se obtienen en el capítulo siguiente contendrá un menor error en sus predicciones.

Otro punto importante para la realización de los modelos es el número de armónicos con los que se ha creado el modelo eléctrico. Como se puede observar en la siguiente tabla para obtener el mismo resultado con la nueva metodología es menor que en la antigua. En esta comparación no se ha tenido en cuenta que los modelos antiguos estaban realizados con otra impedancia de entrada.

cable	nº armónicos antiguos	nº armónicos nuevos
aire	100	94
enterrado	75	68
con amplificacion mecánica	75	70
sin amplificación mecánica	75	71

Tabla 15: Comparación del número de armónicos

Capítulo 3

Estudio sobre acumulación energética

3.1 Estudio de asociaciones paralelo

En un principio para obtener la máxima energía posible se continúa por la línea que se empezó en el proyecto “Alimentación Energy Harvesting basada en fuentes piezoeléctricas”. Esta línea consiste en conectar el número de cables en paralelo necesarios para que el condensador de carga se sature. Una vez se haya conseguido saturar el condensador se procede a asociar bloques que contengan el número de cables hallado en serie para conseguir acumular más energía. Las asociaciones en serie no se han llegado a simular porque como se vera en la figura la asociación en paralelo al llegar a un número bastante alto sigue sin saturarse.

Este estudio se realizó con los modelos sin amplificación mecánica, con amplificación mecánica y coche aéreo. Para poder seguir el estudio y poder utilizar los datos ya obtenidos hasta la fecha se utilizan para este estudio los modelos antiguos aunque contengan error.

Para poder realizar las simulaciones en menos tiempo se decide poner un condensador de 47 μ F para poder realizar las simulaciones en menos tiempo, con el valor de esta capacidad el tiempo necesario para alcanzar el régimen permanente es de 120 segundos. Esto se hace debido a que los recursos consumidos por el programa PsPICE OrCAD son tan desorbitados que hacen imposible la simulación de más cables ya que hay que tener en cuenta que cada uno de estos cables están formados por 75 generadores sinusoidales en serie y por tanto en cada simulación tanto la memoria RAM y el disco duro de los ordenadores del laboratorio son utilizados en su totalidad. Esto se puede observar en el fichero .dat del perfil de la simulación, ya que por ejemplo para una simulación de 600 cables este fichero ocupa más de 200GB.

En las siguientes figuras se muestran los datos obtenidos para la asociación en paralelo de los cables sin amplificación mecánica, en este caso el estudio se realizó hasta 880 cables y como se puede observar la tensión nunca llega a estabilizarse totalmente. En la figura solo se muestra hasta 480 cables para que la gráfica sea más clara.

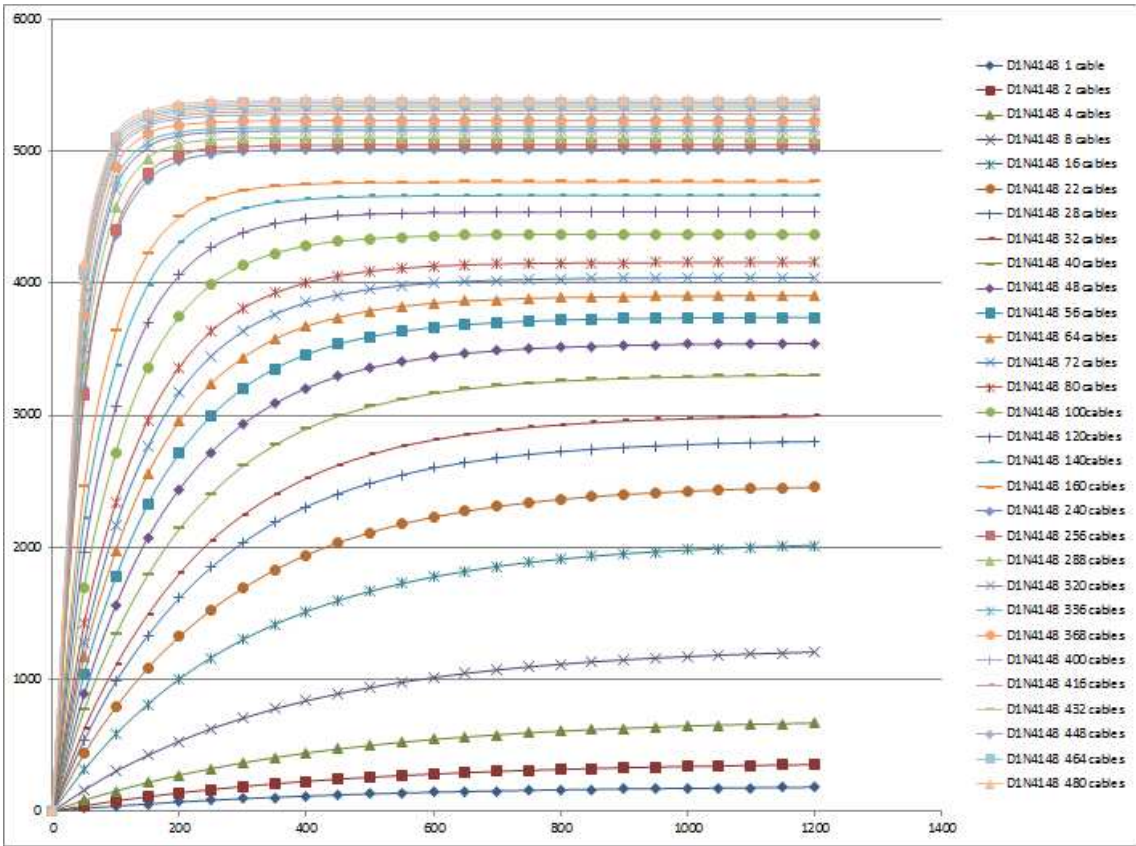


Figura 45: Resultados para asociación en paralelo hasta 480 cables.

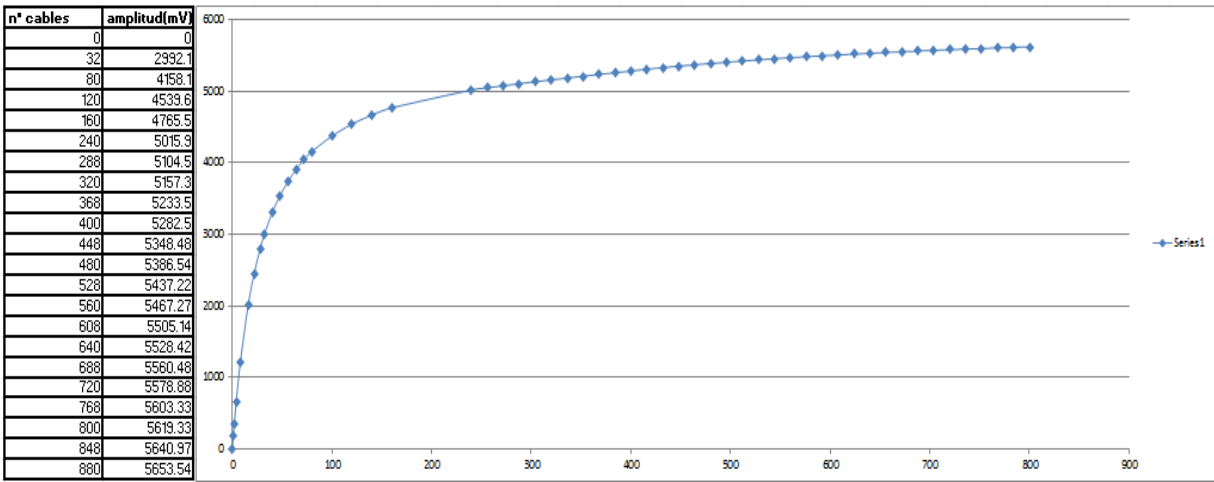


Figura 46: Valor máximo de tensión continua en el condensador para asociación paralelo hasta 880 cables.

3.2 Estudio del comportamiento de los materiales piezoeléctricos con etapa rectificadora con puente de diodos

3.2.1 Curva de regulación y potencia de un cable.

Una vez que se ha comprobado que la simulación directa de asociaciones de elementos piezoeléctricos generadores conduce a un consumo de recursos de simulación exageradamente grande para los medios de que disponemos, se abre una nueva línea de estudio para intentar aplicar modelos equivalentes para el circuito de acumulación de carga que basándose en su regularidad y simetría pudiera simplificar las conclusiones prácticas de predicción de potencia generada en cada caso. Para poder validar esta nueva línea de estudio se contrastarán los resultados que se obtengan de los modelos simplificados con los resultados obtenidos de las simulaciones completas, intentando encontrar el grado de error que puede haber entre ambos.

Se obtiene la curva de regulación de cada cable pero ya trabajando con los modelos nuevos donde el error es menor. Además de los cables se estudiará el piezoeléctrico que se encuentra dentro de un encendedor de chispa. En este estudio el bloque rectificador del circuito será un puente de diodos.

Para obtener la curva de regulación de cualquiera de los elementos piezoeléctricos individuales que se han podido estudiar, conectados al circuito acumulador de carga, se debe variar la resistencia de carga R_L . El valor de esta resistencia se va variando desde un rango desde cero (cortocircuito) hasta infinito (circuito abierto) para tener constancia de todos los casos de carga posibles.

El proceso de adquisición de estos datos es sencillo, consiste en variar el valor de resistencia en el circuito diseñado en el programa OrCAD® en donde lo que nos importa es el valor final de tensión continua alcanzado. Con este valor y el de resistencia de carga ya se pueden calcular la corriente y la potencia siguiendo el principio de la Ley de Ohm $V=I \cdot R$.

$$IL = \frac{VL}{R_L} \quad PL = VL_{Máx} \cdot IL = IL^2 \cdot R_L = \frac{VL^2}{R_L}$$

El circuito diseñado en OrCAD® es el siguiente:

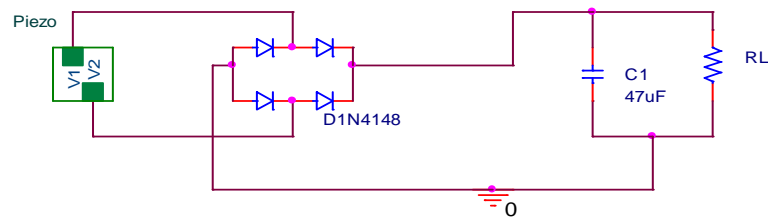


Figura 47: Circuito para obtener los valores de tensión final.

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos para la tensión acumulada V_{max} (v) corriente I_L (A) y potencia P_L (W) en función de la carga acumulada. La siguiente tabla contiene los valores obtenidos para un cable con amplificación mecánica.

RL	Vmax	IL	PL
1	1.75725E-06	1.75725E-06	3.08793E-12
10	0.000016536	1.6536E-06	2.73439E-11
100	0.000110705	1.10705E-06	1.22555E-10
1KΩ	0.000335249	3.35249E-07	1.12392E-10
10KΩ	0.001164782	1.16478E-07	1.35672E-10
100KΩ	0.011048723	1.10487E-07	1.22074E-09
1MΩ	0.104442595	1.04443E-07	1.09083E-08
10MΩ	0.789199794	7.892E-08	6.22836E-08
20MΩ	1.247129038	6.23565E-08	7.77665E-08
30MΩ	1.547059495	5.15686E-08	7.97798E-08
50MΩ	1.912201696	3.8244E-08	7.31303E-08
80MΩ	2.210343717	2.76293E-08	6.10702E-08
100MΩ	2.324142048	2.32414E-08	5.40164E-08
500MΩ	2.816113931	5.63223E-09	1.5861E-08
1GΩ	2.908006421	2.90801E-09	8.4565E-09
C.abierto	3.047538727	3.04754E-30	9.28749E-30

Tabla 16: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable con amplificación mecánica.

A continuación se adjunta la curva de regulación obtenida para la medida proveniente del banco de ensayos utilizando amplificación mecánica. Esta curva relaciona los valores de tensión, eje Y, e intensidad, eje X, obtenidos anteriormente. La pendiente de la curva de regulación al ser constante, representa el valor óhmico de la resistencia equivalente de salida del circuito de acumulación de carga estudiado.

$$pendiente \equiv m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = R$$

En la gráfica puede observarse que el valor máximo de tensión coincide con un valor nulo de corriente reflejando las principales características de circuito abierto ($R_L \rightarrow \infty$), disminuyendo hasta llegar a un sistema en cortocircuito ($R_L \rightarrow 0$) en donde el valor mayor de corriente refleja un valor nulo de tensión.

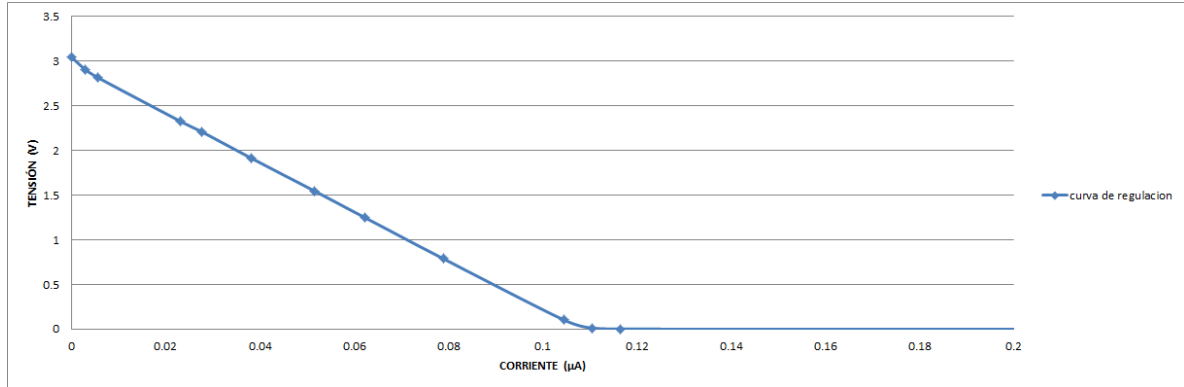


Figura 48: Curva de regulación cable piezoeléctrico con amplificación mecánica

Para poder aprovechar la potencia máxima de cada material necesitamos hacer un estudio de la potencia obtenida. Para poder hacer este estudio se realiza con la curva de potencia, que representa los valores de potencia en el eje Y, en función de las resistencias, eje X.

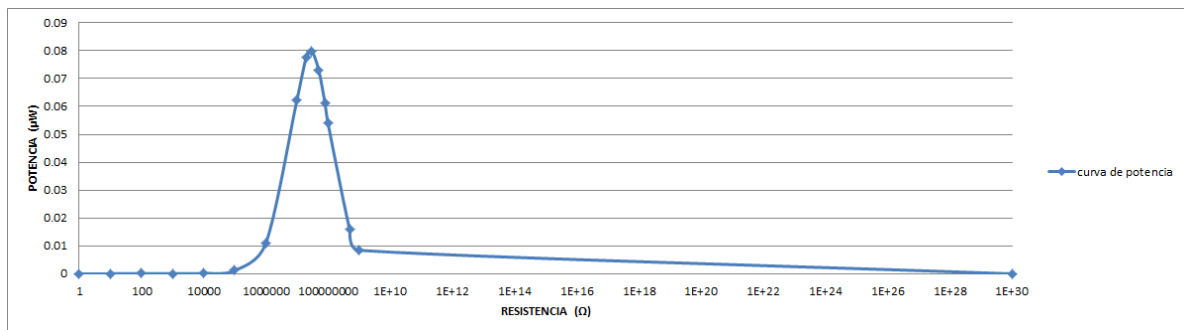


Figura 49: Curva de potencia cable piezoeléctrico con amplificación mecánica

Una vez obtenida la curva de potencia es el momento de encontrar algún tipo de relación con la curva de regulación. Como puede observarse, la curva de potencia representa valores de potencia obtenida en función de valores resistivos, por tanto se conoce el valor máximo de potencia y su valor de resistencia de carga R_L relacionado.

Con este valor resistivo encontrado la mayor potencia obtenida se puede relacionar con la curva de regulación para encontrar el punto óptimo de carga R_L que hace que la potencia entregada sea máxima, verificando este modelo lineal final el teorema de máxima transferencia de potencia.

Puesto que cualquier sistema terminado en una resistencia de carga R_L puede ser transformada en un circuito equivalente constituido por un generador Thèvenin V_{OC} , con una resistencia interna R_O que alimenta la resistencia de carga R_L , se puede decir que el Teorema de máxima transferencia de potencia establece que, dada una fuente V_{OC} , con una resistencia de fuente fijada de antemano R_O , la resistencia de carga R_L que garantiza la máxima transferencia de potencia es aquella cuyo valor óhmico es igual a la resistencia de fuente R_O . Donde su potencia máxima es:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O}$$

Es decir: "Un generador transfiere la máxima potencia a una carga cuando la resistencia de ésta es igual a la resistencia interna del generador."

Una vez conocido el Teorema de máxima transferencia de potencia es el momento de aplicarlo para encontrar el punto óptimo de carga acumulada y conocer los valores de R_O y R_L que hacen máximo el valor de potencia obtenida.

1) Conocer la pendiente de la curva de regulación. La pendiente es de tipo óhmica como se ha explicado anteriormente.

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 50M\Omega) - V(R_L = 10M\Omega)}{I(R_L = 10M\Omega) - I(R_L = 50M\Omega)} = \frac{(1,9122 - 0,7892)}{(7,892 - 3,8244) \cdot 10^{-6}} = 27,707 M\Omega$$

$$m=27,700M\Omega.$$

2) Valor máximo de potencia entregada:

Como se observa en la curva el valor máximo de potencia se obtiene en torno a $25M\Omega$.

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O} = \frac{3,047^2}{4 \cdot 27,707 \cdot 10^6} = 0,083\mu W$$

3) Relación entre R_O y R_L :

Para garantizar la máxima transferencia de potencia las resistencias R_O y R_L deben tener el mismo valor óhmico que rondará los $27,700M\Omega$, valor que entrega $0,083 \mu W$ de potencia.

Como se puede observar, los valores tanto de pendiente de la curva de regulación y el resistivo en el cual se obtiene el mayor valor de potencia tienen un valor semejante que no es otro que el óptimo que se buscaba en este apartado.

A continuación se va a realizar la curva de regulación del cable piezoeléctrico sin amplificación mecánica. La siguiente tabla recoge los datos para la construcción de la curva de regulación y potencia.

RL	Vmax	IL	PL
1	3.7432E-07	3.74318E-07	1.40114E-13
10	3.7308E-06	3.73075E-07	1.39185E-12
100	2.0412E-05	2.04115E-07	4.16629E-12
1KΩ	5.1362E-05	5.13615E-08	2.638E-12
10KΩ	0.0002265	2.26504E-08	5.13041E-12
100KΩ	0.00198223	1.98223E-08	3.92925E-11
1MΩ	0.01993326	1.99333E-08	3.97335E-10
5MΩ	0.08145991	1.6292E-08	1.32714E-09
10MΩ	0.13857499	1.38575E-08	1.9203E-09
20MΩ	0.21887324	1.09437E-08	2.39527E-09
50MΩ	0.34642039	6.92841E-09	2.40014E-09
100MΩ	0.4197235	4.19724E-09	1.76168E-09
500MΩ	0.5226864	1.04537E-09	5.46402E-10
1GΩ	0.54119491	5.41195E-10	2.92892E-10
C.abierto	0.56270452	5.62705E-31	3.16636E-31

Tabla 17: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable sin amplificación mecánica.

Con los valores de tensión y corriente de la tabla anterior se puede calcular la pendiente m de la curva de regulación. Como se ha comentado anteriormente, esta pendiente tendrá unidades óhmicas.

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 50M\Omega) - V(R_L = 10M\Omega)}{I(R_L = 10M\Omega) - I(R_L = 50M\Omega)} = \frac{(0,3464 - 0,13857)}{(1,38575 - 0,69284) \cdot 10^{-8}} = 25,105 M\Omega$$

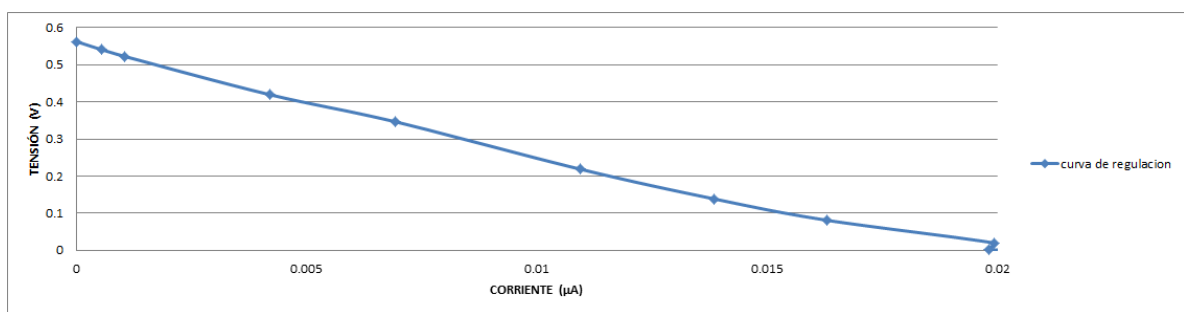


Figura 50: Curva de regulación cable piezoeléctrico sin amplificación mecánica.

En la siguiente curva de potencia se observa que el máximo de potencia obtenida se encuentra para los valores de R_L en torno a $20\text{M}\Omega$, siendo el valor de la pendiente $m=25,105\text{M}\Omega$. Por tanto, aplicando el teorema de máxima transferencia de potencia:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O} = \frac{0,5627^2}{4 \cdot 25,105 \cdot 10^6} = 3,15 \text{ nW}$$

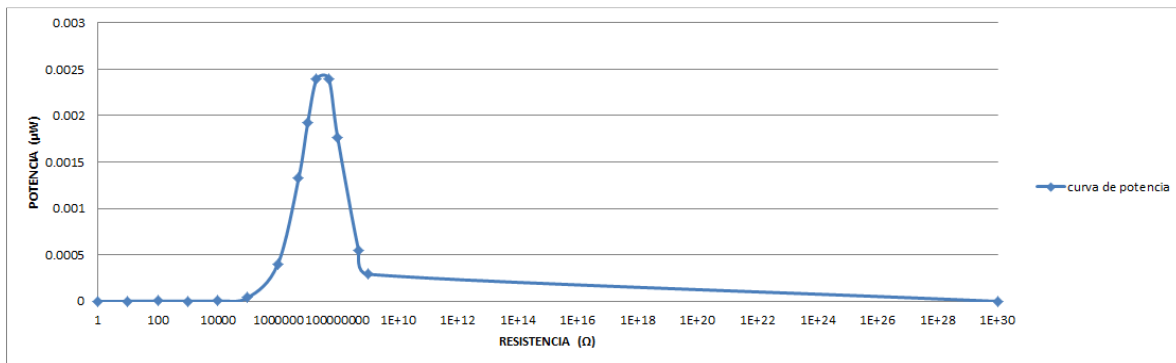


Figura 51: Curva de potencia cable piezoeléctrico sin amplificación mecánica

La siguiente curva de regulación es la del cable piezoeléctrico al aire en el exterior. La siguiente tabla recoge los datos para la construcción de la curva de regulación y potencia.

RL	Vmax	IL	PL
1	2.157E-05	2.15695E-05	4.65243E-10
10	0.00021838	2.18382E-05	4.76905E-09
100	0.0014957	0.000014957	2.23712E-08
1KΩ	0.00437295	4.37295E-06	1.91227E-08
10KΩ	0.010207	1.0207E-06	1.04183E-08
100KΩ	0.080058	8.0058E-07	6.40928E-08
1MΩ	0.7413215	7.41322E-07	5.49558E-07
10MΩ	5.707298	5.7073E-07	3.25733E-06
20MΩ	9.138481	4.56924E-07	4.17559E-06
30MΩ	11.3817556	3.79392E-07	4.31815E-06
40MΩ	13.0497576	3.26244E-07	4.2574E-06
50MΩ	14.2408594	2.84817E-07	4.05604E-06
100MΩ	17.5299477	1.75299E-07	3.07299E-06
500MΩ	22.9953124	4.59906E-08	1.05757E-06
1GΩ	23.775078	2.37751E-08	5.65254E-07
C.abierto	25.5847444	2.55847E-29	6.54579E-28

Tabla 18: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable en el exterior al aire.

La pendiente de la curva de regulación m es:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 50M\Omega) - V(R_L = 10M\Omega)}{I(R_L = 10M\Omega) - I(R_L = 50M\Omega)} = \frac{(14,2408 - 5,7072)}{(2,84817 - 5,7073) \cdot 10^{-7}} = 29,8467 M\Omega$$

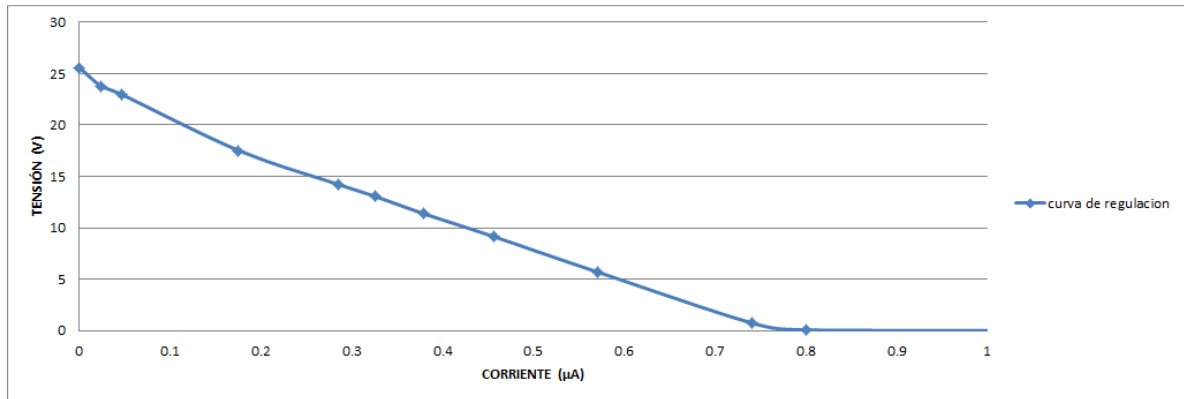


Figura 52: Curva de regulación cable piezoeléctrico en el exterior al aire.

Aplicando el teorema de máxima transferencia de potencia el cable piezoeléctrico en el exterior al aire entrega la siguiente potencia:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{oc}^2}{4 \cdot R_o} = \frac{25,584^2}{4 \cdot 29,8467 \cdot 10^6} = 5,48 \mu W$$

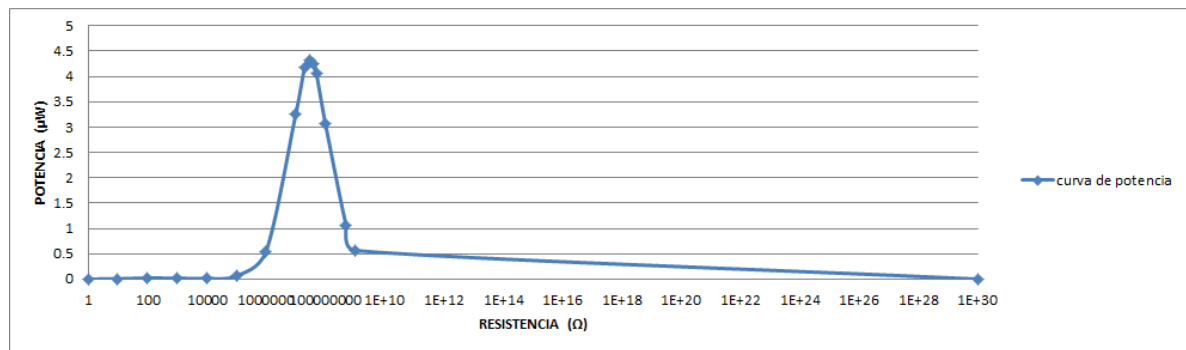


Figura 53: Curva de potencia cable piezoeléctrico en el exterior al aire

A continuación se va a realizar la curva de regulación del último cable piezoeléctrico, el cable enterrado en el exterior. La siguiente tabla recoge los datos para la construcción de la curva de regulación y potencia. Como se observa en la tabla el estudio se ha realizado en torno a los valores de la resistencia donde se produce la mayor transferencia de potencia, que es la zona que nos interesa. Esto se realiza para ahorrar tiempo y número de simulaciones.

RL	Vmax	IL	PL
10MΩ	0.454070138	4.5407E-08	2.0618E-08
15MΩ	0.584890657	3.8993E-08	2.28065E-08
20MΩ	0.682986327	3.4149E-08	2.33235E-08
25MΩ	0.760626856	3.0425E-08	2.31421E-08
30MΩ	0.822403208	2.7413E-08	2.25449E-08
35MΩ	0.873380768	2.4954E-08	2.17941E-08
40MΩ	0.915619616	2.289E-08	2.0959E-08
C.abierto	1.47245	1.4725E-30	2.16811E-30

Tabla 19: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable en el exterior enterrado.

La pendiente de la curva de regulación m es:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 35M\Omega) - V(R_L = 15M\Omega)}{I(R_L = 15M\Omega) - I(R_L = 35M\Omega)} = \frac{(0,8733 - 0,5848)}{(3,8993 - 2,4954) \cdot 10^{-8}} = 20,55 \text{ M}\Omega$$

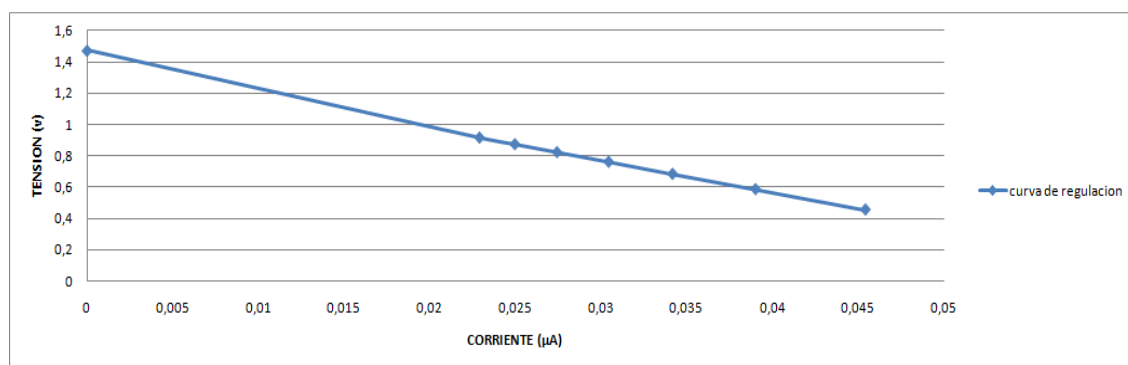


Figura 54: Curva de regulación cable piezoeléctrico en el exterior enterrado.

Aplicando el teorema de máxima transferencia de potencia el cable piezoeléctrico en el exterior enterrado es capaz de entregar la siguiente potencia:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{oc}^2}{4 \cdot R_o} = \frac{1,4724^2}{4 \cdot 20,55 \cdot 10^6} = 26,37 \text{ nW}$$

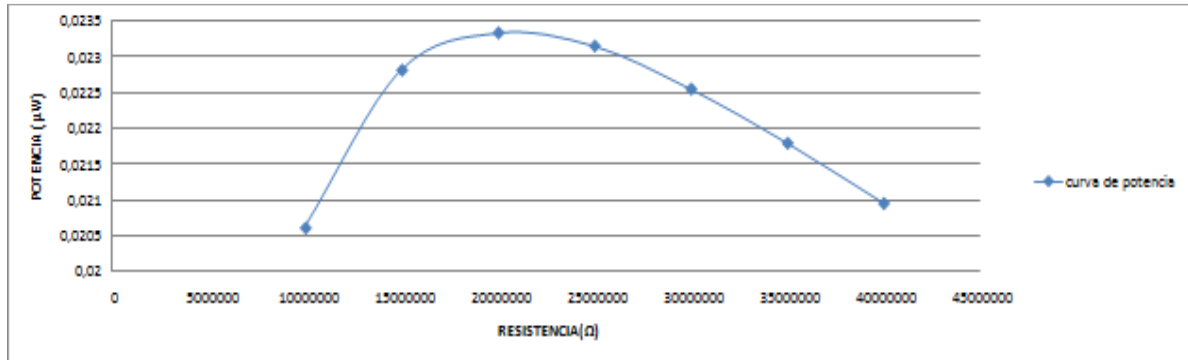


Figura 55: Curva de potencia cable piezoeléctrico en el exterior enterrado.

Como se ha podido con los datos calculados la potencia que es capaz de entregar el cable piezoeléctrico es muy pequeña. Para conseguir más potencia se decide estudiar otro material piezoeléctrico, este material es el que se encuentra dentro de un encendedor de chispa comercial.

Para poder realizar el estudio de este material los diodos usados son 1N4007 que tienen una tensión de ruptura de 1000V en la realidad pero en el modelo de Orcad se ha comprobado que el modelo tiene una tensión de ruptura de 1500V. Si la tensión continua es superior a 1500 se añaden diodos en serie. Para realizar la curva del piezoeléctrico del encendedor se ha utilizado el siguiente circuito.

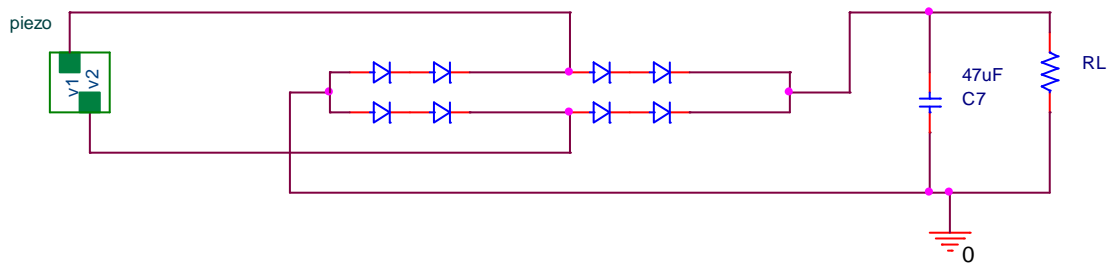


Figura 56: Circuito para obtener los valores de tensión final del encendedor.

En la siguiente tabla se recogen los valores obtenidos para la realización de la curva de regulación y potencia del piezoeléctrico del encendedor.

RL	Vmax	IL	PL
100MΩ	126.305	1.26305E-06	0.00015953
200MΩ	234.48	1.1724E-06	0.0002749
300MΩ	334.504	1.11501E-06	0.00037298
400MΩ	426.002	1.06501E-06	0.00045369
500MΩ	506.514	1.01303E-06	0.00051311
1500MΩ	1049.2	6.99467E-07	0.00073388
1600MΩ	1085	6.78125E-07	0.00073577
1700MΩ	1119.5	6.58529E-07	0.00073722
1800MΩ	1151.4	6.39667E-07	0.00073651
1900MΩ	1181.5	6.21842E-07	0.00073471
C.abierto	2395.03	2.39503E-27	5.7362E-24

Tabla 20: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un encendedor comercial.

La pendiente de la curva de regulación m es:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 1900M\Omega) - V(R_L = 1600M\Omega)}{I(R_L = 1600M\Omega) - I(R_L = 1900M\Omega)} = \frac{(1181,5 - 1085)}{(6,78125 - 6,2184) \cdot 10^{-7}} = 1714,5 M\Omega$$

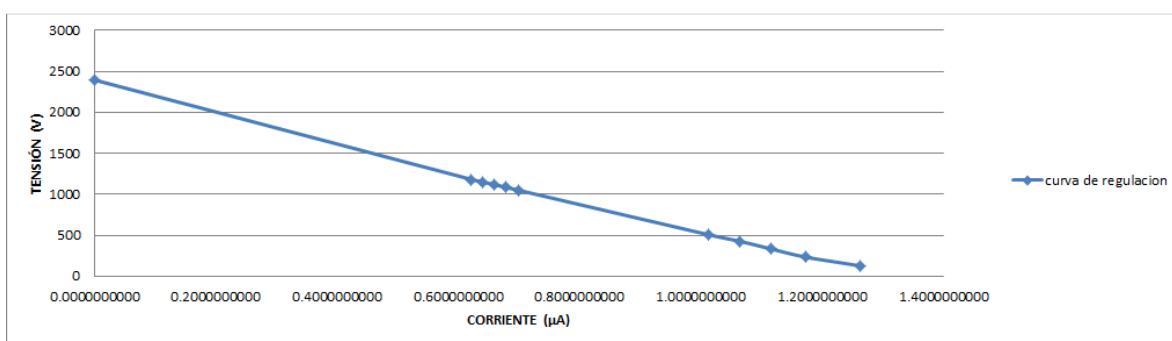


Figura 57: Curva de regulación de un encendedor comercial.

Aplicando el teorema de máxima transferencia de potencia el encendedor comercial es capaz de entregar la siguiente potencia:

$$P_{Máx} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O} = \frac{2395,03^2}{4 \cdot 1714,5 \cdot 10^6} = 836 \mu W$$

Como se puede observar la potencia entregada por el piezoeléctrico del encendedor es mucho más grande que la entregada por el cable piezoeléctrico.

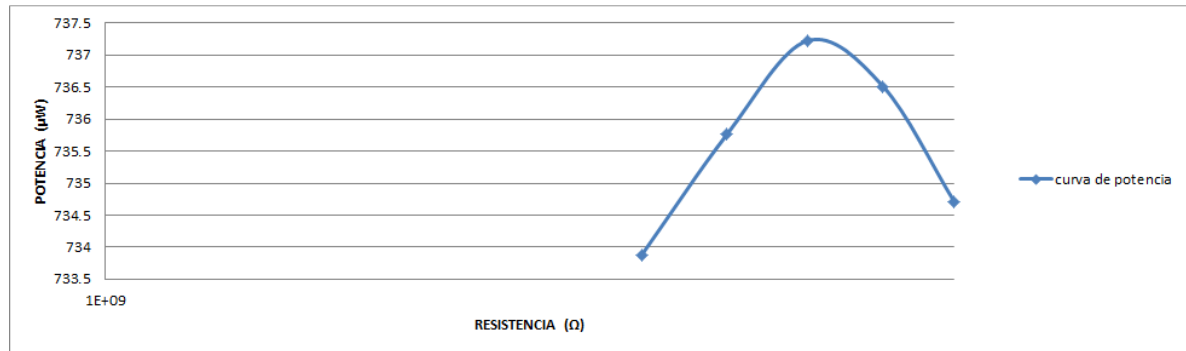


Figura 58: Curva de potencia del encendedor comercial.

3.2.2 Curva de regulación y potencia de 80 cables asociados en paralelo.

En el siguiente estudio se trata de ver el efecto que tienen 80 cables asociados en paralelo en la potencia entregada. Cada cable tiene su propia etapa rectificadora que en este caso es un puente de diodos. A la vez que se realiza este estudio se va a realizar otro para comprobar el efecto que tiene el tiempo de desfase que hay entre los cables colocados de forma consecutiva bajo el pavimento en la tensión final.

Para realizar este estudio el procedimiento es el mismo que se siguió con un cable. Primero se obtienen los datos de la misma manera que con un cable y se construyen las curvas de regulación y potencia. En la siguiente tabla se muestran los valores para la construcción de las curvas de regulación y potencia teniendo en cuenta el tiempo de desfase y sin tenerlo en cuenta.

RL	Vmax	IL	PL	Vmax (sinTD)	IL(sinTD)	PL(sinTD)
10KΩ	0.085313	8.5313E-06	7.27831E-07	0.084587	8.4587E-06	7.155E-07
100KΩ	0.6691525	6.69153E-06	4.47765E-06	0.666417	6.6642E-06	4.4411E-06
200KΩ	1.089806	5.44903E-06	5.93839E-06	1.087238	5.4362E-06	5.9104E-06
300KΩ	1.3827355	4.60912E-06	6.37319E-06	1.380296	0.000004601	6.3507E-06
400KΩ	1.5987938	3.99698E-06	6.39035E-06	1.590567	3.9764E-06	6.3248E-06
500KΩ	1.7627183	3.52544E-06	6.21435E-06	1.7479635	3.4959E-06	6.1108E-06
600KΩ	1.889806	3.14968E-06	5.95228E-06	1.8813325	3.1356E-06	0.000005899
700KΩ	1.99771885	2.85388E-06	5.70126E-06	1.98728	0.000002839	5.6418E-06
10MΩ	2.966226	2.96623E-07	8.7985E-07	2.944308	2.944E-07	8.669E-07
C.abierto	3.07	3.07E-30	9.4249E-30	3.0463405	3.05E-30	9.28E-30

Tabla 21: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 cables con amplificación mecánica.

Como se observa en la tabla el estudio se centra en los valores de resistencia donde se produce una mayor transferencia de potencia. Como se comprobó en el estudio con un cable el valor de la resistencia donde se produce la mayor transferencia de potencia tiene el mismo valor que la pendiente de la curva de regulación. La pendiente m de los dos casos es la siguiente:

Con tiempo de desfase:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 700K\Omega) - V(R_L = 200K\Omega)}{I(R_L = 200k\Omega) - I(R_L = 700k\Omega)} = \frac{(1,9977 - 1,0898)}{(5,449 - 2,8538) \cdot 10^{-6}} = 349,8 K\Omega$$

Sin tiempo de desfase:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 700K\Omega) - V(R_L = 200K\Omega)}{I(R_L = 200k\Omega) - I(R_L = 700k\Omega)} = \frac{(1,9872 - 1,087)}{(5,4362 - 2,839) \cdot 10^{-6}} = 346,5 K\Omega$$

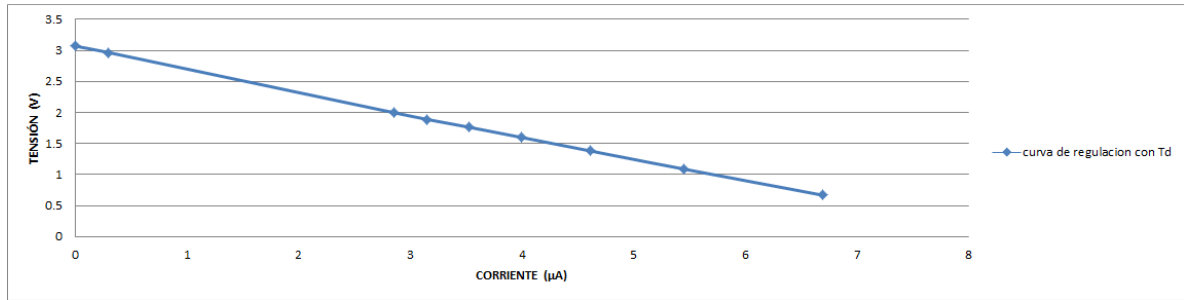


Figura 59: Curva de regulación 80 cables piezoeléctrico con amplificación mecánica en paralelo con TD.

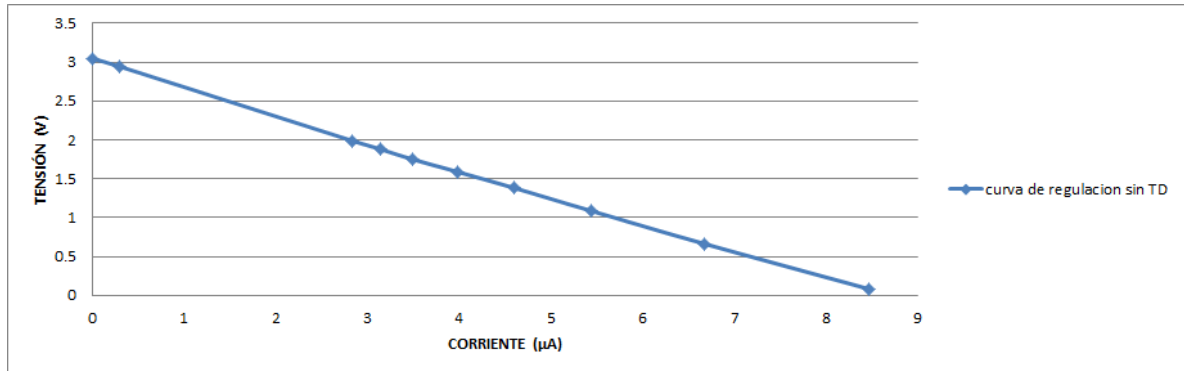


Figura 60: Curva de regulación 80 cables piezoeléctrico con amplificación mecánica en paralelo sin TD.

Como en el caso con un cable piezoeléctrico también se aplica el teorema de máxima transferencia de potencia para calcular la máxima potencia que puede entregar esta asociación:

Con tiempo de desfase:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O} = \frac{3,07^2}{4 \cdot 349,8 \cdot 10^3} = 6,73 \mu W$$

Sin tiempo de desfase:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O} = \frac{3,046^2}{4 \cdot 346,5 \cdot 10^3} = 6,694 \mu W$$

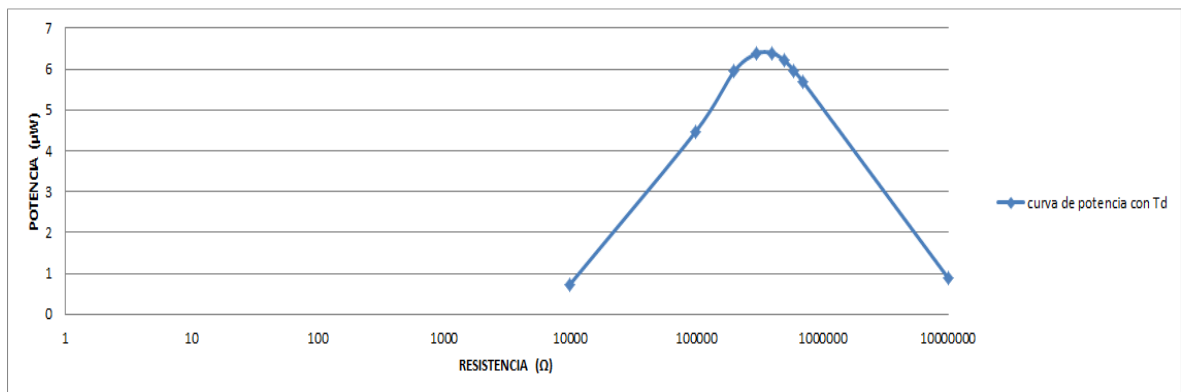


Figura 61: Curva de potencia de 80 cables piezoeléctricos con amplificación mecánica en paralelo con TD.

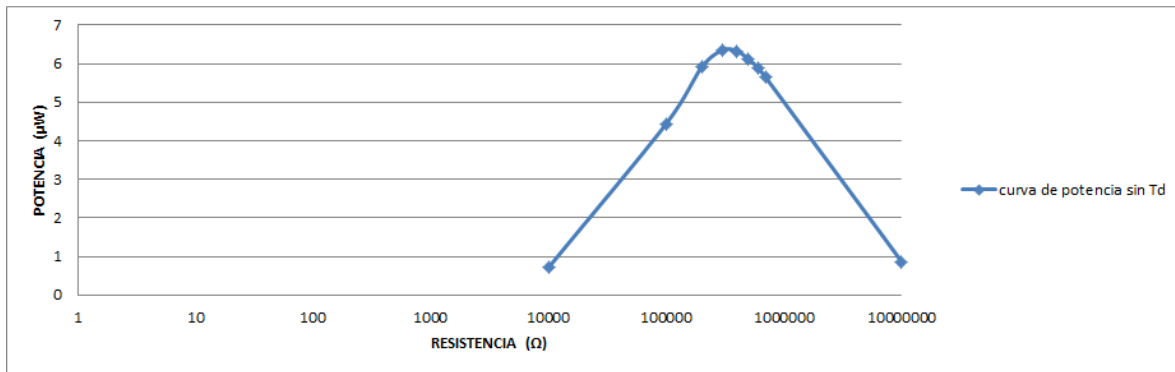


Figura 62: Curva de potencia de 80 cables piezoeléctricos con amplificación mecánica en paralelo sin TD.

En este estudio se va a seguir el mismo orden que se siguió con un cable. En la tabla que se ve mas abajo se muestra los valores para poder realizar la curva de regulación y potencia de la asociación en paralelo de 80 cables piezoeléctricos sin amplificación mecánica. Como en el caso anterior se muestran los datos teniendo en cuenta el tiempo de desfase y sin tiempo de desfase.

RL	Vmax	IL	PL	Vmax (sinTD)	IL(sinTD)	PL(sinTD)
10KΩ	0.015016	1.5016E-06	2.2548E-08	0.015044	1.5044E-06	2.26322E-08
100KΩ	0.11817785	1.18178E-06	1.3966E-07	0.117685	1.1769E-06	1.38498E-07
200KΩ	0.191831	9.59155E-07	1.83996E-07	0.1906408	9.532E-07	1.8172E-07
300KΩ	0.24417335	8.13911E-07	1.98735E-07	0.2423368	8.0779E-07	1.95757E-07
400KΩ	0.283235	7.08088E-07	2.00555E-07	0.2808508	7.0213E-07	1.97193E-07
500KΩ	0.31341575	6.26832E-07	1.96459E-07	0.31067195	6.2134E-07	1.93034E-07
600KΩ	0.3374384	5.62397E-07	1.89774E-07	0.33444875	5.5742E-07	1.86427E-07
700KΩ	0.3570759	5.10108E-07	1.82147E-07	0.3538542	5.0551E-07	1.78875E-07
10MΩ	0.546	5.46E-08	2.98116E-08	0.541994	5.4199E-08	2.93757E-08
C.abierto	0.5661015	5.66102E-31	3.20471E-31	0.561688	5.6169E-31	3.15493E-31

Tabla 22: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 cables sin amplificación mecánica.

La pendiente de la curva de regulación es la siguiente:

Con tiempo de desfase:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 600K\Omega) - V(R_L = 200K\Omega)}{I(R_L = 200k\Omega) - I(R_L = 600k\Omega)} = \frac{(0,3374 - 0,1918)}{(9,59155 - 5,62397) \cdot 10^{-7}} = 366,9 K\Omega$$

Sin tiempo de desfase:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 600K\Omega) - V(R_L = 200K\Omega)}{I(R_L = 200k\Omega) - I(R_L = 600k\Omega)} = \frac{(0,3344 - 0,1906)}{(9,532 - 5,5742) \cdot 10^{-7}} = 363,3 \Omega$$

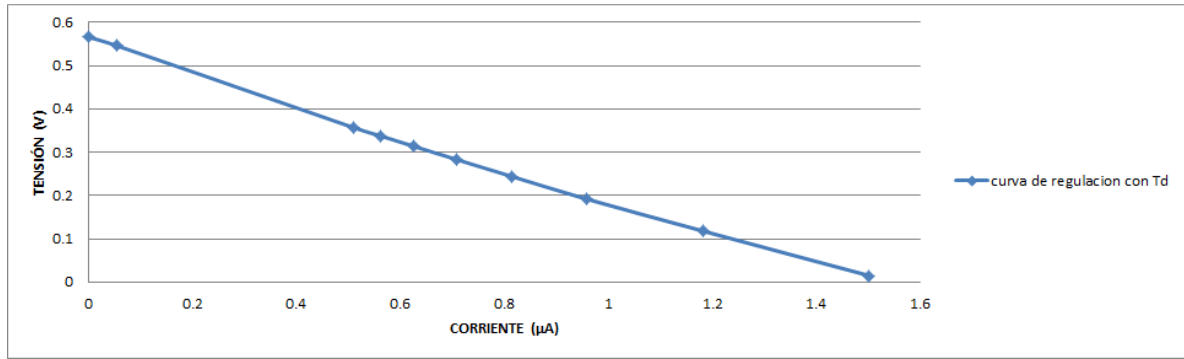


Figura 63: Curva de regulación 80 cables piezoeléctrico sin amplificación mecánica en paralelo con TD.

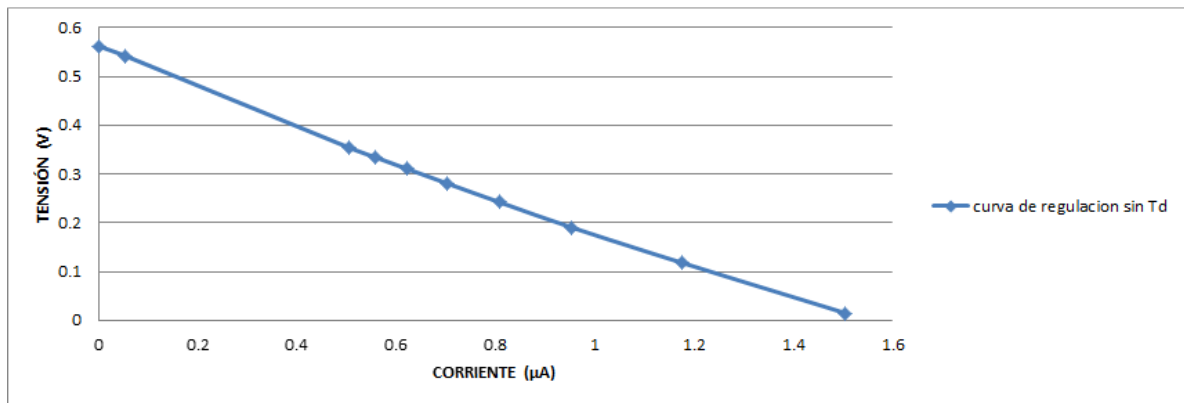


Figura 64: Curva de regulación 80 cables piezoeléctrico sin amplificación mecánica en paralelo sin TD.

Aplicando el teorema de máxima transferencia de potencia se obtiene la siguiente potencia para los dos casos:

Con tiempo de desfase:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O} = \frac{0,5661^2}{4 \cdot 366,9 \cdot 10^3} = 0,218 \mu W$$

Sin tiempo de desfase:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O} = \frac{0,5616^2}{4 \cdot 363,3 \cdot 10^3} = 0,217 \mu W$$

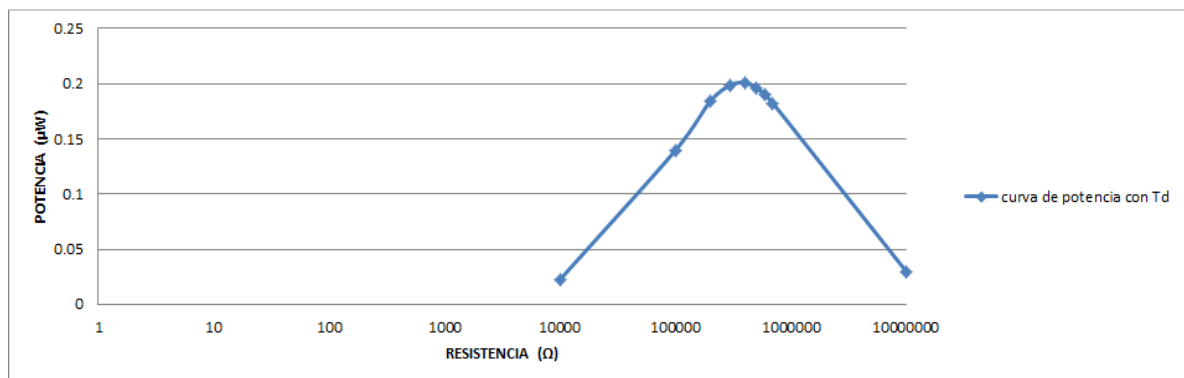


Figura 65: Curva de potencia de 80 cables piezoeléctricos sin amplificación mecánica en paralelo con TD.

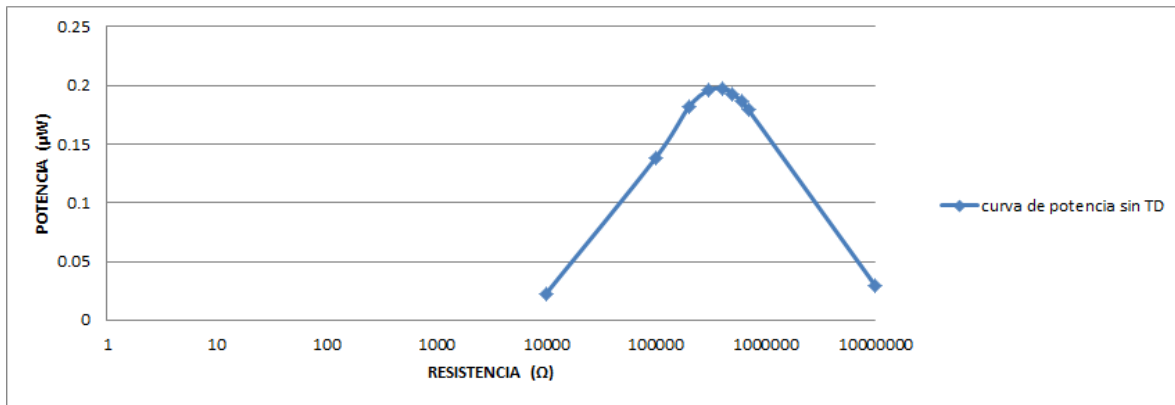


Figura 66: Curva de potencia de 80 cables piezoeléctricos sin amplificación mecánica en paralelo sin TD.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para poder realizar la construcción de la curva de regulación y la curva de potencia de la asociación de 80 cables piezoeléctricos en el exterior al aire.

RL	Vmax	IL	PL	Vmax (sinTD)	IL(sinTD)	PL(sinTD)
10KΩ	0.63131	0.000063131	3.98552E-05	0.63439	0.000063439	4.02451E-05
100KΩ	4.76505	4.76505E-05	0.000227057	4.7964	0.000047964	0.000230055
200KΩ	7.881099	3.94055E-05	0.000310559	7.9212365	3.96062E-05	0.00031373
300KΩ	10.0760575	3.35869E-05	0.000338423	10.134543	3.37818E-05	0.000342363
400KΩ	11.708901	2.92723E-05	0.000342746	11.7644145	0.000029411	0.000346004
500KΩ	12.965616	2.59312E-05	0.000336214	13.0373015	2.60746E-05	0.000339943
600KΩ	13.9664	2.32773E-05	0.000325101	14.0240295	2.33734E-05	0.000327789
10MΩ	24.68446	2.4684E-06	6.09323E-05	24.8448	2.4845E-06	6.17264E-05
C.abierto	25.615933	2.56159E-29	6.56176E-28	25.784227	2.57842E-29	6.64826E-28

Tabla 23: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 cables en el exterior al aire.

La pendiente de la curva de regulación es la siguiente en cada caso:

Con tiempo de desfase:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 500K\Omega) - V(R_L = 200K\Omega)}{I(R_L = 200k\Omega) - I(R_L = 500k\Omega)} = \frac{(12,965 - 7,881)}{(3,9405 - 2,59312) \cdot 10^{-5}} = 378 K\Omega$$

Sin tiempo de desfase:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 500K\Omega) - V(R_L = 200K\Omega)}{I(R_L = 200k\Omega) - I(R_L = 500k\Omega)} = \frac{(13,037 - 7,921)}{(3,9606 - 2,6074) \cdot 10^{-5}} = 377,3 \Omega$$

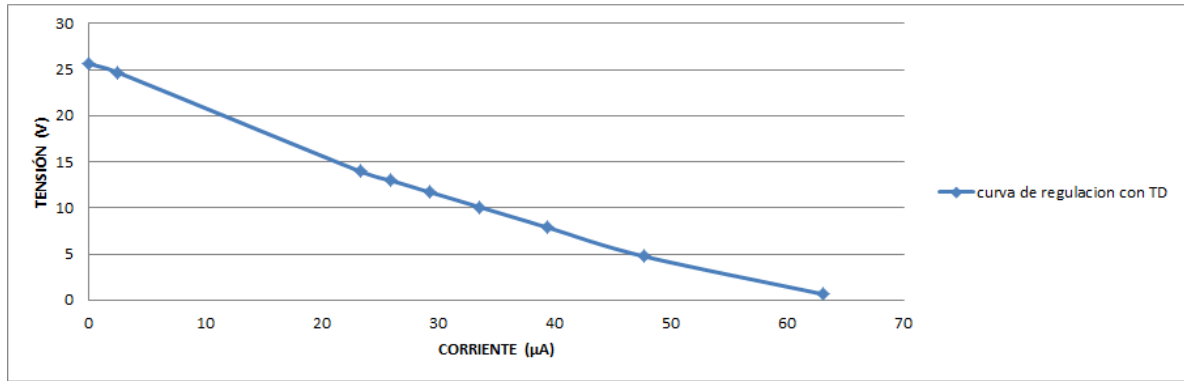


Figura 67: Curva de regulación 80 cables piezoeléctrico en paralelo en el exterior al aire con TD.

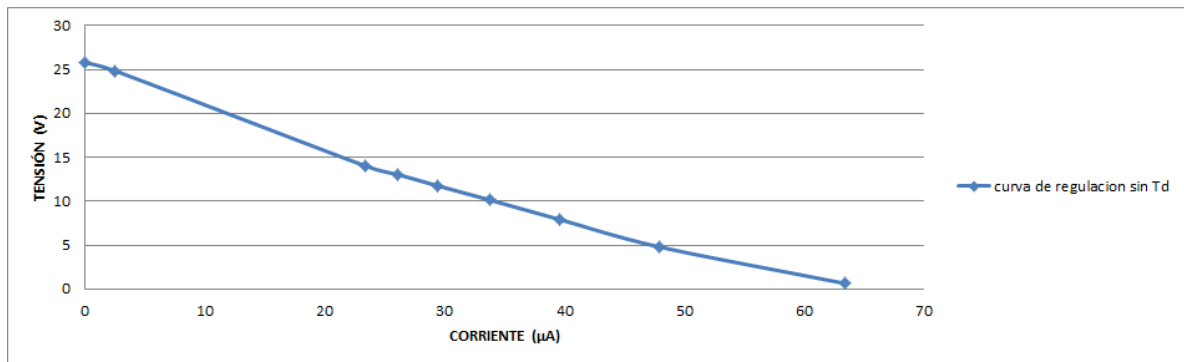


Figura 68: Curva de regulación 80 cables piezoeléctrico en paralelo en el exterior al aire sin TD.

La máxima potencia que se puede obtener en cada caso es la siguiente:

Con tiempo de desfase:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_0} = \frac{25,6159^2}{4 \cdot 378 \cdot 10^3} = 433,9 \mu W$$

Sin tiempo de desfase:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_0} = \frac{25,7842^2}{4 \cdot 377,3 \cdot 10^3} = 440,5 \mu W$$

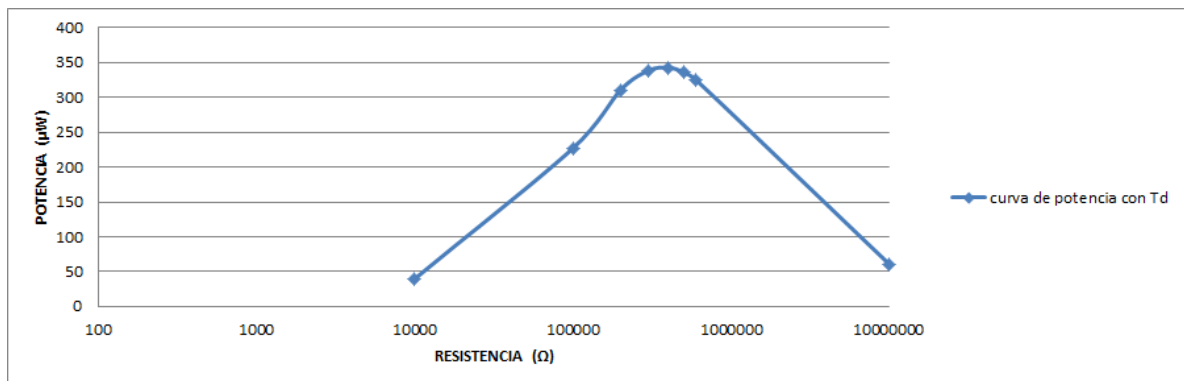


Figura 69: Curva de potencia de 80 cables piezoeléctricos en paralelo en el exterior al aire con TD.

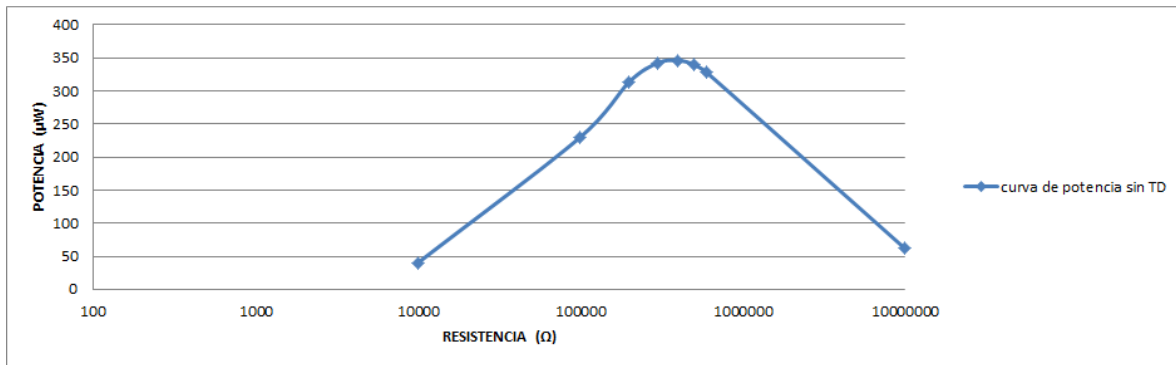


Figura 70: Curva de potencia de 80 cables piezoeléctricos en paralelo en el exterior al aire sin TD.

El último caso estudiado con asociación de 80 cables en paralelo es el caso del cable piezoeléctrico en el exterior enterrado. En la siguiente tabla se muestra los valores obtenidos para la creación de la curva de regulación y curva de potencia de esta asociación.

RL	Vmax	IL	PL	Vmax (sinTD)	IL(sinTD)	PL(sinTD)
10KΩ	0.05568	0.000005568	3.10026E-07	0.05461	0.000005461	2.982E-07
100KΩ	0.38928	3.8928E-06	1.51539E-06	0.384813	3.8481E-06	1.4808E-06
200KΩ	0.609296	3.04648E-06	1.85621E-06	0.602493	3.0125E-06	0.000001815
300KΩ	0.7497165	2.49906E-06	1.87358E-06	0.741922	2.4731E-06	1.8348E-06
400KΩ	0.8471275	2.11782E-06	1.79406E-06	0.839492	2.0987E-06	1.7619E-06
500KΩ	0.9241094	1.84822E-06	1.70796E-06	0.9111805	1.8224E-06	1.6605E-06
600KΩ	0.973643	1.62274E-06	1.57997E-06	0.9662085	1.6103E-06	1.5559E-06
700KΩ	1.0171135	1.45302E-06	1.47789E-06	1.009823	1.4426E-06	1.4568E-06
10MΩ	1.4437	1.4437E-07	2.08427E-07	1.43414	1.434E-07	2.057E-07
C.abierto	1.4806455	1.48065E-30	2.19231E-30	1.4713469	1.47135E-30	2.16486E-30

Tabla 24: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 cables en el exterior enterrado.

La pendiente de la curva de regulación en cada caso es la siguiente:

Con tiempo de desfase:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 600K\Omega) - V(R_L = 200K\Omega)}{I(R_L = 200k\Omega) - I(R_L = 600k\Omega)} = \frac{(0,9736 - 0,6092)}{(3,0464 - 1,6227) \cdot 10^{-6}} = 255,9 K\Omega$$

Sin tiempo de desfase:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 600K\Omega) - V(R_L = 200K\Omega)}{I(R_L = 200k\Omega) - I(R_L = 600k\Omega)} = \frac{(0,9662 - 0,6024)}{(3,0125 - 1,6103) \cdot 10^{-6}} = 259,4 K\Omega$$

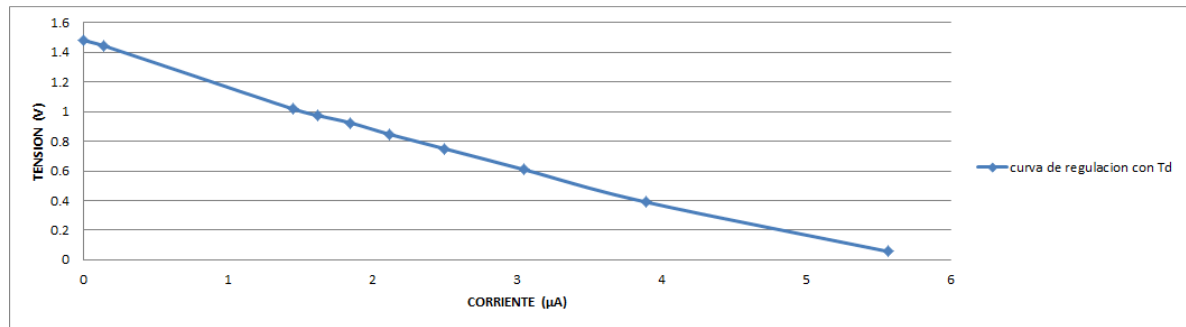


Figura 71: Curva de regulación 80 cables piezoeléctrico en paralelo en el exterior enterrado con TD.

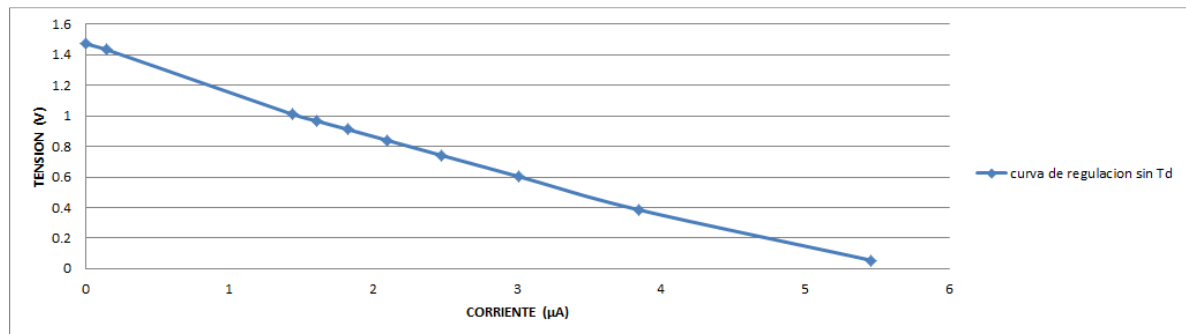


Figura 72: Curva de regulación 80 cables piezoeléctrico en paralelo en el exterior enterrado sin TD.

La máxima potencia que se puede obtener en cada caso es la siguiente:

Con tiempo de desfase:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{oc}^2}{4 \cdot R_o} = \frac{1,4806^2}{4 \cdot 255,9 \cdot 10^3} = 2,14 \mu W$$

Sin tiempo de desfase:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{oc}^2}{4 \cdot R_o} = \frac{1,4713^2}{4 \cdot 259,4 \cdot 10^3} = 2,08 \mu W$$

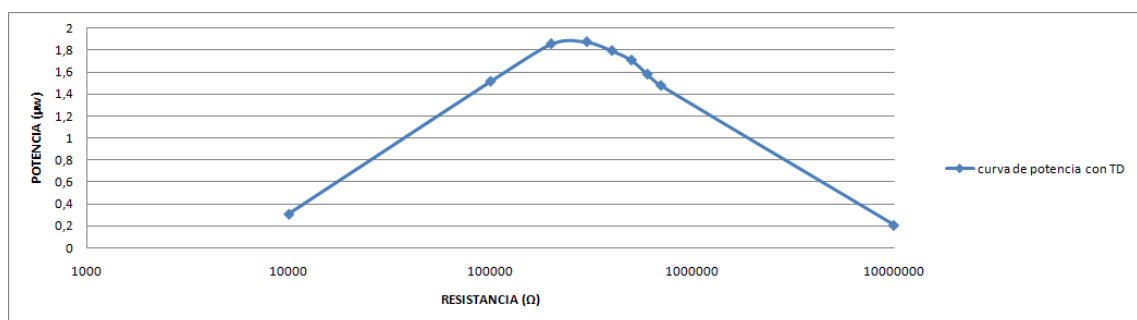


Figura 73: Curva de potencia de 80 cables piezoeléctricos en paralelo en el exterior enterrado con TD.

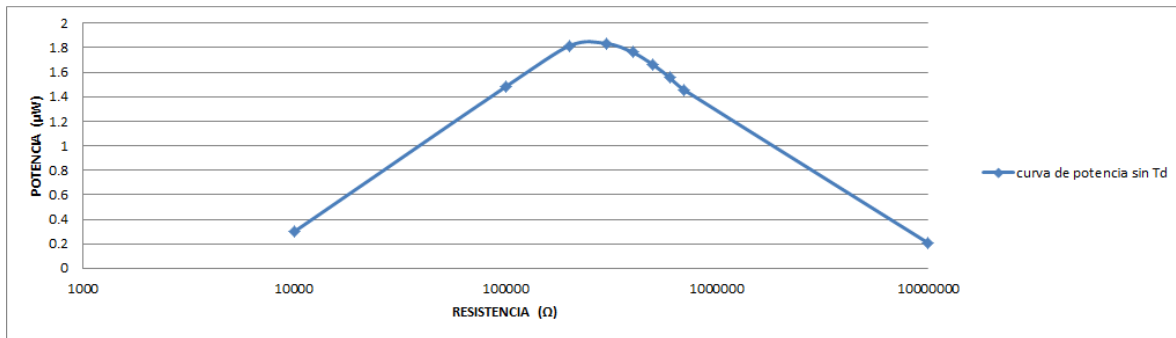


Figura 74: Curva de potencia de 80 cables piezoeléctricos en paralelo en el exterior enterrado sin TD.

Por último se ha realizado este estudio con el material piezoeléctrico que hay dentro de un encendedor comercial. En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos para la creación de la curva de regulación y la curva de potencia del material piezoeléctrico de un mechero.

RL	Vmax	IL	PL	Vmax (sinTD)	IL(sinTD)	PL(sinTD)
5MΩ	426.770131	8.5354E-05	0.03642655	424.326945	8.49E-05	0.03601067
10MΩ	717.448	7.1745E-05	0.05147316	713.3408575	7.13E-05	0.05088552
15MΩ	928.172145	6.1878E-05	0.05743357	922.490536	6.15E-05	0.05673259
20MΩ	1083.4	0.00005417	0.05868778	1080.143775	5.40E-05	0.05833553
25MΩ	1212.6	4.8504E-05	0.05881595	1204.767	4.82E-05	0.05805854
30MΩ	1313.4	0.00004378	0.05750065	1304.1995	4.35E-05	0.05669788
35MΩ	1397.07226	3.9916E-05	0.05576603	1387.119885	3.96E-05	0.05497433
1GΩ	2329.00702	2.329E-06	0.00542427	2318.8675	2.32E-06	0.00537715
C.abierto	2378.64	2.3786E-27	5.6579E-24	2368.045	2.37E-27	5.61E-24

Tabla 25: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 encendedores comerciales.

La pendiente de la curva de regulación para los dos casos es la siguiente:

Con tiempo de desfase:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 30M\Omega) - V(R_L = 10M\Omega)}{I(R_L = 10M\Omega) - I(R_L = 30M\Omega)} = \frac{(1313,4 - 717,448)}{(7,1745 - 4,378) \cdot 10^{-5}} = 21,31 M\Omega$$

Sin tiempo de desfase:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 30M\Omega) - V(R_L = 10M\Omega)}{I(R_L = 10\Omega) - I(R_L = 30M\Omega)} = \frac{(1304,19 - 713,34)}{(7,13 - 4,35) \cdot 10^{-5}} = 21,20 M\Omega$$

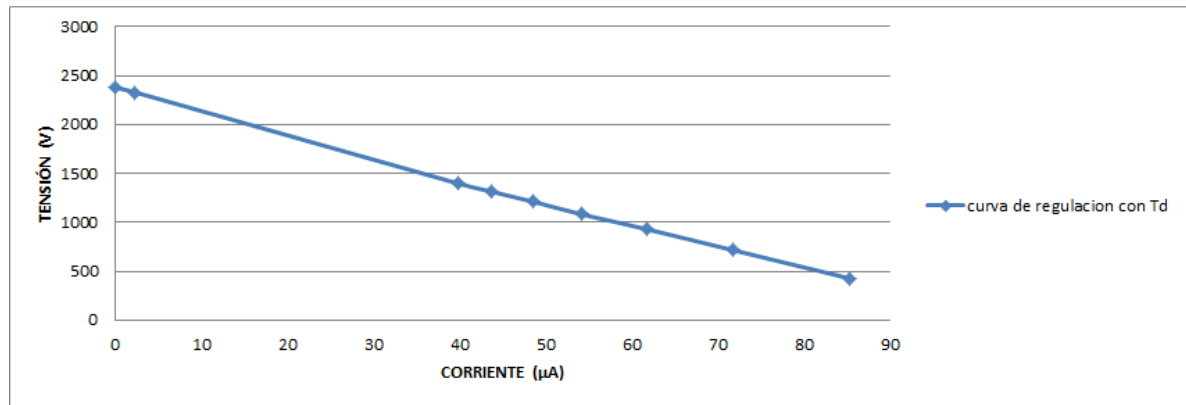


Figura 75: Curva de regulación 80 encendedores en paralelo con TD.

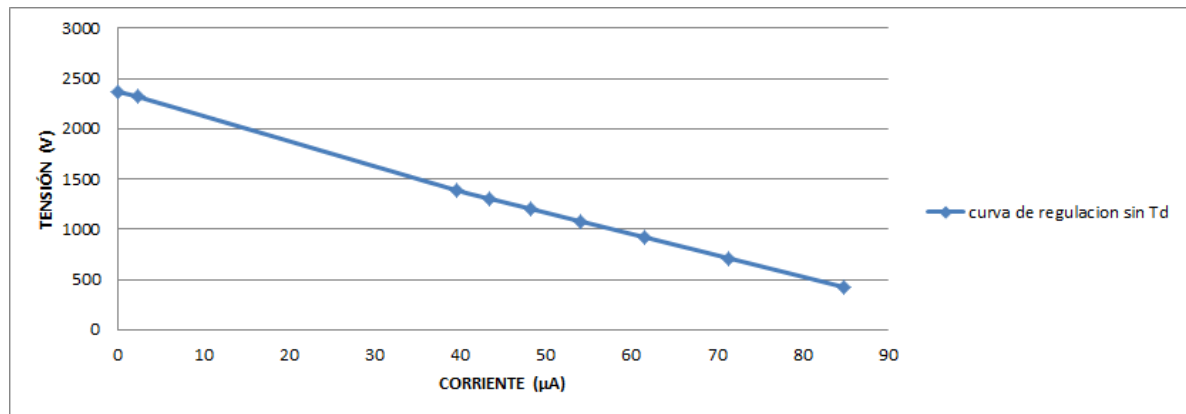


Figura 76: Curva de regulación 80 encendedores en paralelo con TD.

La máxima potencia que se puede obtener en cada caso es la siguiente:

Con tiempo de desfase:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O} = \frac{2378,64^2}{4 \cdot 21,31 \cdot 10^6} = 66,3 \text{ mW}$$

Sin tiempo de desfase:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O} = \frac{2368,045^2}{4 \cdot 21,20 \cdot 10^6} = 66,1 \text{ mW}$$

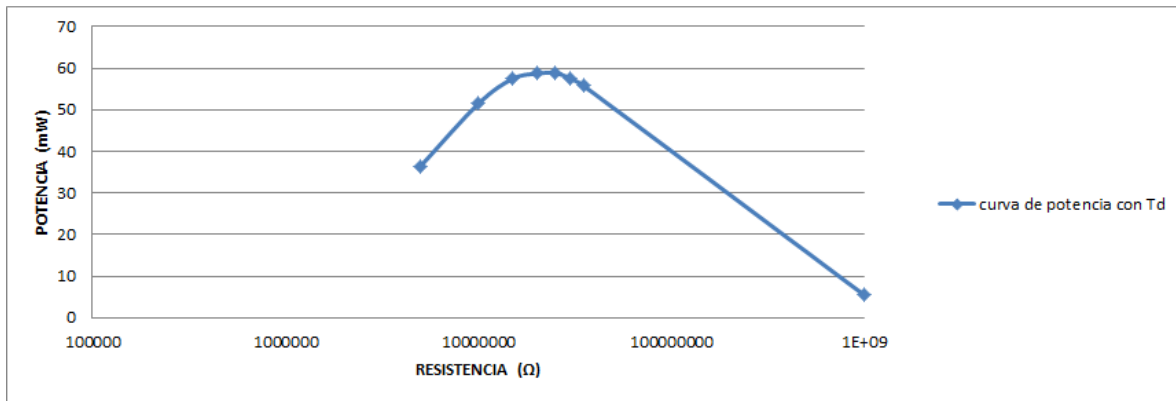


Figura 77: Curva de potencia de 80 encendedores comerciales con TD.

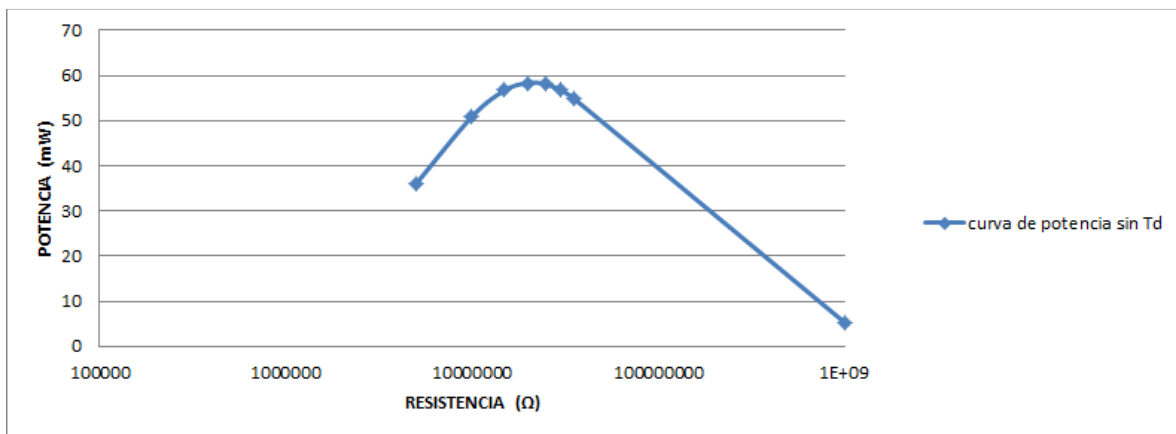


Figura 78: Curva de potencia de 80 encendedores comerciales sin TD.

Como se ha podido comprobar con este estudio la influencia del tiempo de desfase es mínima, ya que se obtienen prácticamente los mismo resultados en todos lo casos estudiados con tiempo de desfase y sin tiempo de desfase. Esto se puede observar mejor en la siguiente tabla en donde se comparan los resultados de los diferentes modelos realizados con tiempo de desfase y sin tiempo de desfase.

modelo	Voc	R0	Voc (sin Td)	R0 (sin td)	diferencia Voc (%)	diferencia R0 (%)
amplificacion mecacnica	3.07	349.8 kΩ	3.0463	346.5 kΩ	0.77	0.95
sin amplificacion mecanica	0.5661	366.9 kΩ	0.56168	363.3 kΩ	0.78	0.99
exterior al aire	25.616	377.3 kΩ	25.784	378 kΩ	0.66	0.19
exterior enterrado	1.48	255.9 kΩ	1.471	259.4 kΩ	0.61	1.37
encendedor comercial	2378.64	21.31 MΩ	2368.045	21.20 MΩ	0.45	0.48

Tabla 26: Comparación de los valores con Td y sin Td.

3.2.3 Curva de regulación y potencia de 2 bloques en serie de 80 cables asociados en paralelo.

El último estudio que se ha realizado con una etapa rectificadora formada con un puente de diodos es la asociación en serie de dos bloques de 80 cables piezoeléctricos en paralelo. Al igual que en el caso anterior cada cable piezoeléctrico tiene su propia etapa rectificadora formada por un puente de diodo. Aunque en el estudio anterior se comprobó que el tiempo de desfase no influye mucho, se va a seguir trabajando con modelos con tiempo de desfase porque es como se encontrarían en la realidad.

El procedimiento que se lleva a cabo para realizar el cálculo de la curva de regulación y potencia es el mismo que se ha llevado en los anteriores estudios. En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos para la construcción de la curva de regulación y potencia de la asociación en serie de dos bloques de 80 cables en paralelo con amplificación mecánica.

RL	Vmax	IL	PL
10KΩ	0.09205	0.000009205	8.4732E-07
300KΩ	1.86535035	6.21783E-06	1.15984E-05
400KΩ	2.25346905	5.63367E-06	1.26953E-05
500KΩ	2.5731711	5.14634E-06	1.32424E-05
600KΩ	2.8422008	4.737E-06	1.34635E-05
700KΩ	3.0723107	4.38902E-06	1.34844E-05
800KΩ	3.2710715	4.08884E-06	1.33749E-05
900KΩ	3.4450795	3.82787E-06	1.31873E-05
10MΩ	5.775138	5.77514E-07	3.33522E-06
C.abierto	6.1555547	6.15555E-30	3.78909E-29

Tabla 27: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo con amplificación mecánica.

Como ya se hizo en las asociaciones anteriores el estudio se centra en el valor de la resistencia donde se produce la mayor transferencia de potencia. Como se ha comprobado el valor de la resistencia donde se produce la mayor transferencia de potencia es igual al valor de la pendiente de la curva de regulación, en este caso el valor de la pendiente es:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 800K\Omega) - V(R_L = 400K\Omega)}{I(R_L = 400K\Omega) - I(R_L = 800K\Omega)} = \frac{(3,271 - 2,2534)}{(5,6336 - 4,0888) \cdot 10^{-6}} = 658,7 \Omega$$

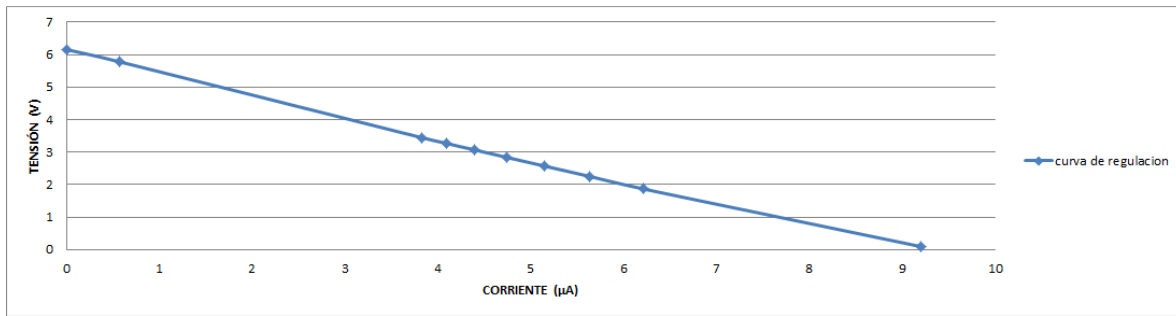


Figura 79: Curva de regulación de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo con amplificación mecánica.

Como en los anteriores casos se aplica el teorema de máxima transferencia de potencia para obtener la máxima potencia que es capaz de entregar esta forma de asociar los cables piezoeléctricos con amplificación mecánica. Esta potencia es:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O} = \frac{6,1555^2}{4 \cdot 658,7 \cdot 10^3} = 14,3 \mu W$$

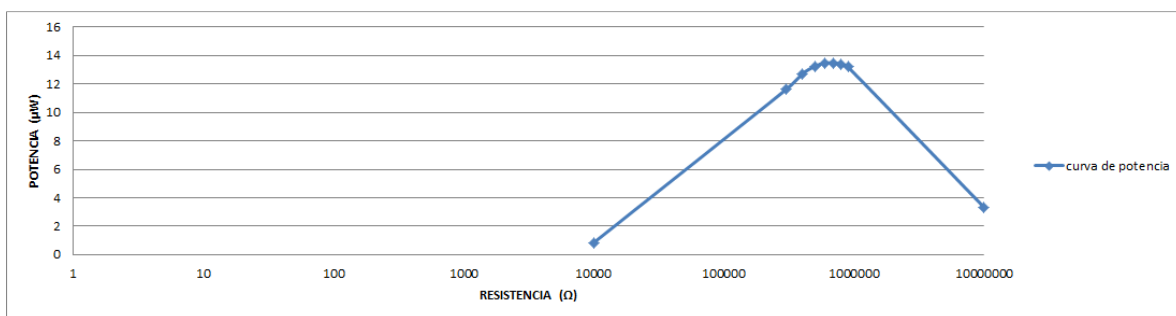


Figura 80: Curva de potencia de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo con amplificación mecánica.

Se va a seguir el orden que se ha establecido en los anteriores estudios. En la siguiente tabla se muestra los valores obtenidos para la elaboración de la curva de regulación y de potencia de la asociación de 2 bloques de 80 cables piezoeléctricos en serie sin amplificación mecánica.

RL	Vmax	IL	PL
10KΩ	0.015985	1.5985E-06	2.5552E-08
300KΩ	0.318156607	1.06052E-06	3.37412E-07
400KΩ	0.384426935	9.61067E-07	3.6946E-07
500KΩ	0.440346142	8.80692E-07	3.87809E-07
600KΩ	0.488231921	8.1372E-07	3.97284E-07
700KΩ	0.52961385	7.56591E-07	4.00701E-07
800KΩ	0.565782983	7.07229E-07	4.00138E-07
900KΩ	0.597653645	6.6406E-07	3.96878E-07
10MΩ	1.080841	1.08084E-07	1.16822E-07
C.abierto	1.158062264	1.15806E-30	1.34111E-30

Tabla 28: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo sin amplificación mecánica.

La pendiente de la curva de regulación es la siguiente:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 800K\Omega) - V(R_L = 400K\Omega)}{I(R_L = 400K\Omega) - I(R_L = 800K\Omega)} = \frac{(0,5657 - 0,3844)}{(9,61067 - 7,07229) \cdot 10^{-7}} = 714,4 K\Omega$$

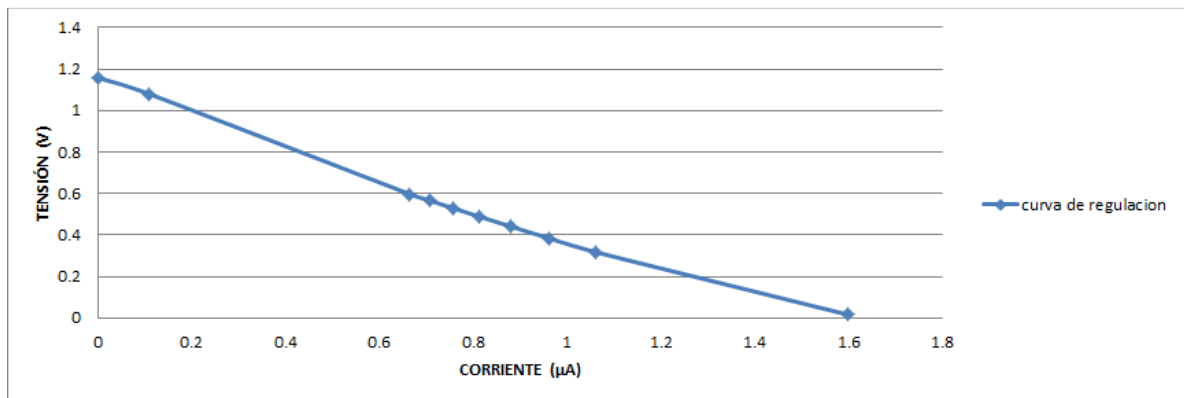


Figura 81: Curva de regulación de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo sin amplificación mecánica.

La máxima potencia que puede entregar esta asociación es la siguiente:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O} = \frac{1,158^2}{4 \cdot 714,4 \cdot 10^3} = 0,469 \mu W$$

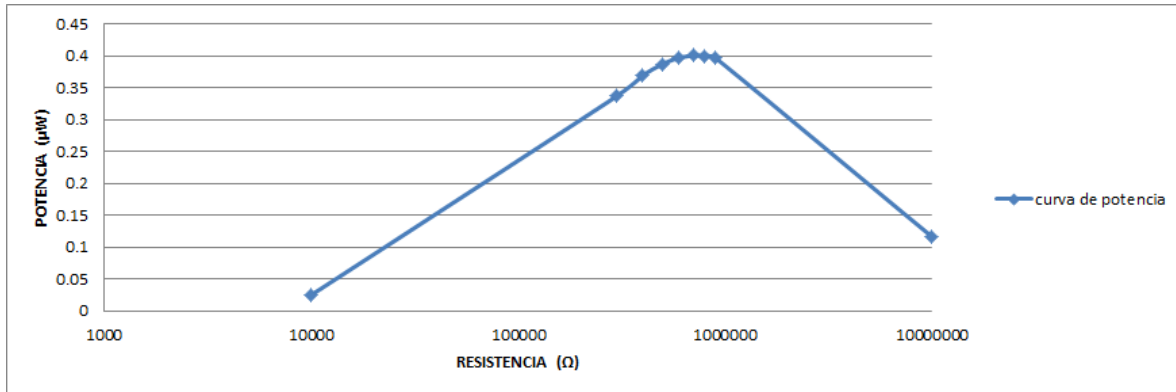


Figura 82: Curva de potencia de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo sin amplificación mecánica.

A continuación se muestran en la siguiente tabla los valores obtenidos para la creación de la curva de regulación y de potencia de la asociación de 2 bloques de 80 cables piezoeléctricos situados en el exterior al aire.

RL	Vmax	IL	PL
300KΩ	15.58485	5.19495E-05	0.000809625
400KΩ	18.347751	4.58694E-05	0.0008416
500KΩ	20.6706895	4.13414E-05	0.000854555
600KΩ	22.5989775	3.7665E-05	0.00085119
700KΩ	24.2542315	3.46489E-05	0.000840382
800KΩ	25.661097	3.20764E-05	0.000823115
900KΩ	26.8861845	2.98735E-05	0.000803185
C.abierto	49.010321	4.90103E-29	2.40201E-27

Tabla 29: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo en el exterior al aire.

La pendiente de la curva de regulación es la siguiente:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 900K\Omega) - V(R_L = 500K\Omega)}{I(R_L = 500K\Omega) - I(R_L = 900K\Omega)} = \frac{(26,886 - 20,670)}{(4,13414 - 2,98735) \cdot 10^{-5}} = 542 K\Omega$$

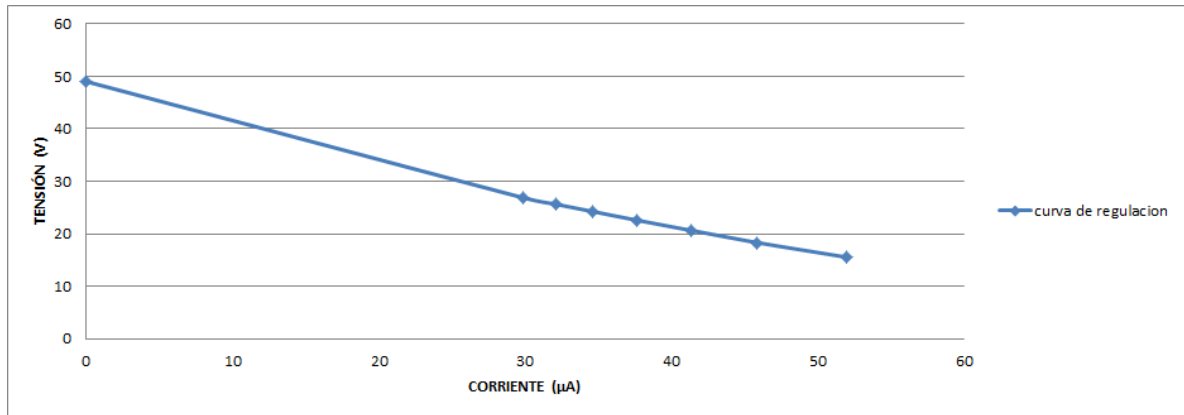


Figura 83: Curva de regulación de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo en el exterior al aire.

La máxima potencia que se puede entregar con esta asociación de cables es la siguiente:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{oc}^2}{4 \cdot R_o} = \frac{49,01^2}{4 \cdot 542 \cdot 10^3} = 1,107 mW$$

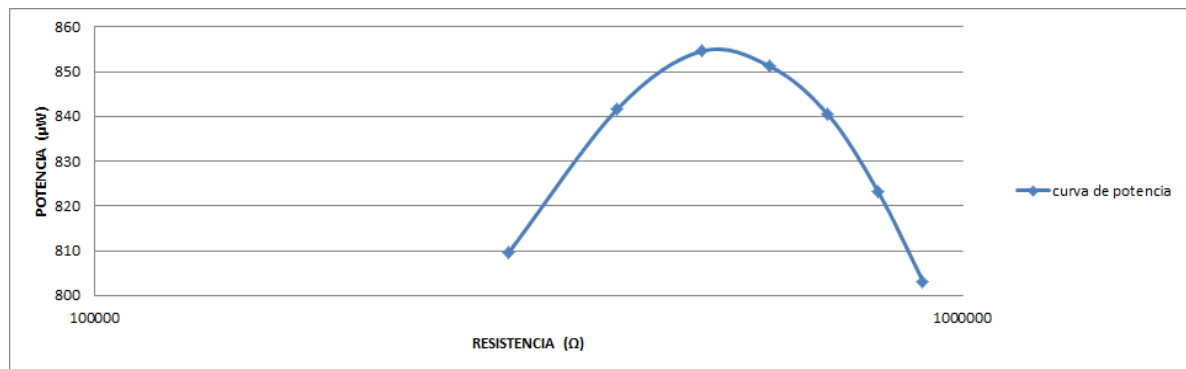


Figura 84: Curva de potencia de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo en el exterior al aire.

El último estudio que se ha realizado con los cables piezoeléctricos es la asociación de 2 bloques de 80 cables piezoeléctricos situados en el exterior enterrados. En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos para la realización de la curva de regulación.

RL	Vmax	IL	PL
200KΩ	0.950366	4.75183E-06	4.51598E-06
300KΩ	1.1895395	3.96513E-06	4.71668E-06
400KΩ	1.374782	3.43696E-06	4.72506E-06
500KΩ	1.522615	3.04523E-06	4.63671E-06
600KΩ	1.6437955	2.73966E-06	4.50344E-06
700KΩ	1.7437015	2.491E-06	4.34356E-06
800KΩ	1.829381	2.28673E-06	4.18329E-06
C.abierto	2.8968914	2.89689E-30	8.39198E-30

Tabla 30: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo en el exterior enterrado.

La pendiente en este caso es la siguiente:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 700K\Omega) - V(R_L = 400K\Omega)}{I(R_L = 400K\Omega) - I(R_L = 700K\Omega)} = \frac{(1,743 - 1,374)}{(3,43696 - 2,491) \cdot 10^{-6}} = 390 K\Omega$$

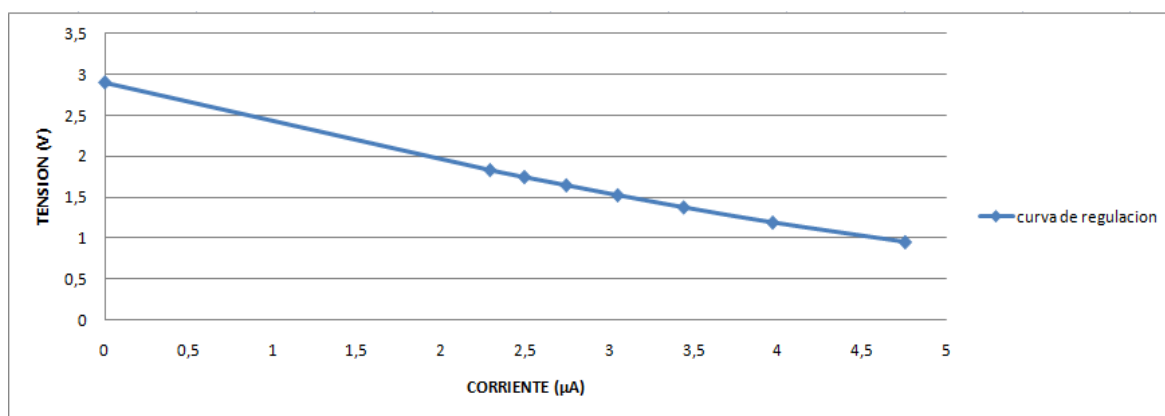


Figura 85: Curva de regulación de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo en el exterior enterrado.

La potencia máxima entregada por esta asociación es la siguiente:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_0} = \frac{2,896^2}{4 \cdot 390 \cdot 10^3} = 5,376 \mu W$$

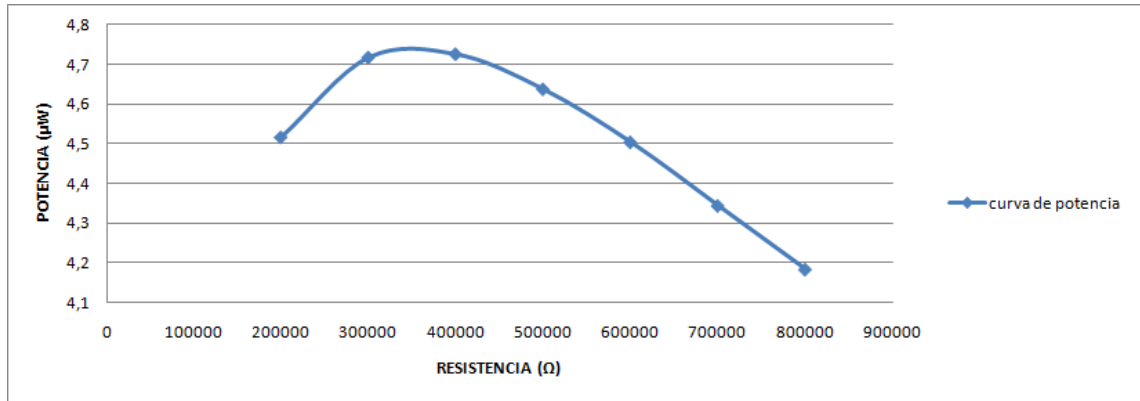


Figura 86: Curva de regulación de dos bloques en serie de 80 cables en paralelo en el exterior enterrado.

El último estudio con esta manera de asociar los componentes piezoeléctricos se ha realizado con el material piezoeléctrico que contiene un encendedor comercial. Como se ha venido comprobando este material es capaz de aportar mucha mas energía que los cables piezoeléctricos. En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos para la creación de la curva de regulación y potencia.

RL	Vmax	IL	PL
100KΩ	11.991	0.00011991	0.001437841
10 MΩ	990	0.000099	0.09801
20 MΩ	1499.11781	7.49559E-05	0.11236771
30 MΩ	1846.529712	6.1551E-05	0.113655733
40 MΩ	2085.04021	5.2126E-05	0.108684817
50 MΩ	2283.412158	4.56682E-05	0.104279422
60 MΩ	2460.067066	4.10011E-05	0.100865499
70 MΩ	2602.079029	3.71726E-05	0.096725932
80 MΩ	2718.087573	3.39761E-05	0.092350001
100MΩ	2899.601245	2.8996E-05	0.084076874
C.abierto	4469.99746	4.47E-27	1.99809E-23

Tabla 31: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de dos bloques en serie de 80 encendedores en paralelo.

Pendiente de la curva de regulación:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 80 \text{ M}\Omega) - V(R_L = 50 \text{ M}\Omega)}{I(R_L = 50 \text{ M}\Omega) - I(R_L = 80 \text{ M}\Omega)} = \frac{(2718 - 2283,4)}{(4,5668 - 3,3976) \cdot 10^{-5}} = 37,1 \text{ M}\Omega$$

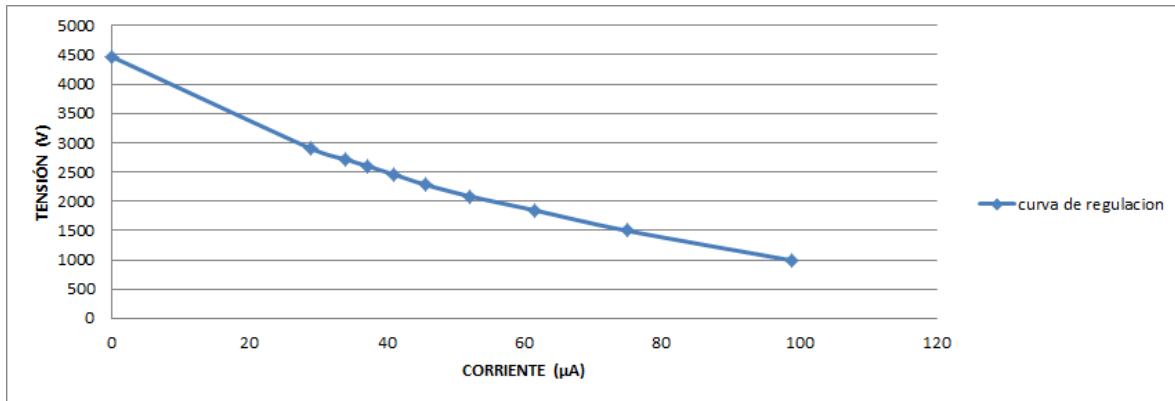


Figura 87: Curva de regulación de dos bloques en serie de 80 encendedores en paralelo.

La potencia máxima que es capaz de entregar esta asociación es la siguiente:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O} = \frac{4469,9^2}{4 \cdot 37,1 \cdot 10^6} = 134 \text{ mW}$$

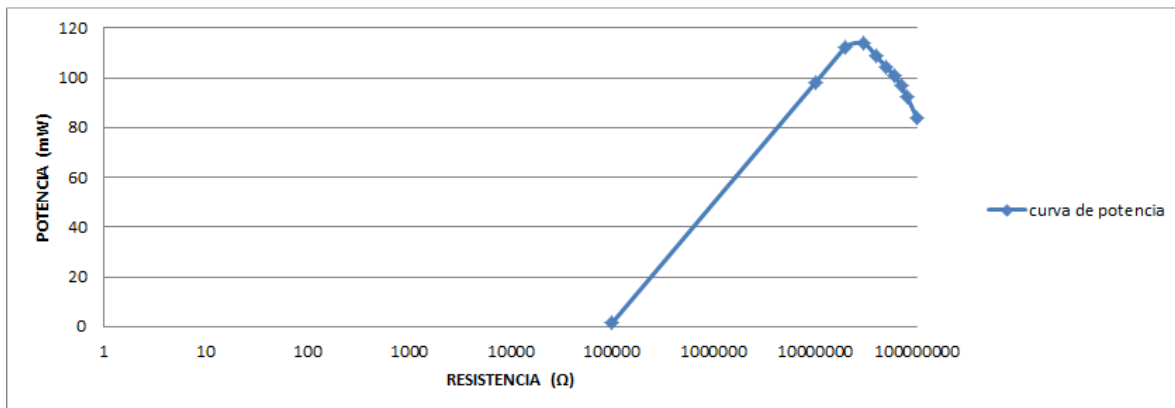


Figura 88: Curva de potencia de dos bloques en serie de 80 encendedores en paralelo.

3.2.4 Comparación de resultados.

Una vez obtenido todos los resultados de todas las asociaciones utilizando como etapa rectificadora un puente de diodos se va a proceder a comprobar los resultados. La primera conclusión ya se obtuvo en el punto 3.2.2 donde se pudo comprobar que la influencia del tiempo de desfase sobre la tensión máxima y la resistencia donde se produce la mayor transferencia de potencia es mínima.

En este punto se va a estudiar el efecto del número de cables y la forma de asociarlos. Para poder ver el efecto del número de cables se van a comparar los resultados de las asociaciones obtenidos con los resultados obtenidos por 1 cable piezoeléctrico o un encendedor. A continuación se muestran cinco tablas donde se pueden ver la comparación de los resultados de cada modelo de cable y del material piezoeléctrico de un encendedor comercial.

asociación	Voc	Ro	Pmax	comparación en veces con un cable		
				Voc	Ro	Pmax
1 cable	3.04	27.707 MΩ	0.083 μW			
80 cables en paralelo	3.07	349.8 KΩ	6.73 μW	0.99	79.21	81.08
2 bloques de 80 en serie	6.1555	658.7 KΩ	14.3 μW	2.02	42.06	172.29

Tabla 32: Comparación resultados del modelo de cable con amplificación mecánica.

asociación	Voc	Ro	Pmax	comparación en veces con un cable		
				Voc	Ro	Pmax
1 cable	0.5627	27.105 MΩ	3.15 nW			
80 cables en paralelo	0.5661	366.9 KΩ	218 μW	0.99	68.42	69.21
2 bloques de 80 en serie	1.158	714.4 KΩ	0.469 μW	2.06	35.14	148.89

Tabla 33: Comparación resultados del modelo de cable sin amplificación mecánica.

asociación	Voc	Ro	Pmax	comparación en veces con un cable		
				Voc	Ro	Pmax
1 cable	25.584	29.487 MΩ	5.48 nW			
80 cables en paralelo	25.6159	378 KΩ	433.9 μW	1.00	78.96	79.18
2 bloques de 80 en serie	49.01	542 KΩ	1.107 mW	1.92	55.07	202.01

Tabla 34: Comparación resultados del modelo de cable en el exterior al aire.

asociación	Voc	Ro	Pmax	comparación en veces con un cable		
				Voc	Ro	Pmax
1 cable	1.4724	20.55 MΩ	26.37 nW			
80 cables en paralelo	1.4806	255.9 KΩ	2.14 μW	1.01	80.3	81.15
2 bloques de 80 en serie	2.896	390 KΩ	5.376 μW	1.97	52.69	203.87

Tabla 35: Comparación resultados del modelo de cable en el exterior enterrado.

asociación	Voc	Ro	Pmax	comparacion en veces con un cable		
				Voc	Ro	Pmax
1 cable	2395.03	1714.5 MΩ	836 μW			
80 cables en paralelo	2378.64	21.31 MΩ	66.3 mW	0.99	80.46	79.31
2 bloques de 80 en serie	4469.9	37.1 MΩ	134 mW	1.87	46.21	160.29

Tabla 36: Comparación resultados del modelo del encendedor comercial.

A la vista de los resultados obtenidos y teniendo en cuenta que todos los modelos parten con un error para poder trabajar de forma mas sencilla. Este error se va acumulando entre todos los modelos por eso las conclusiones sean obtenido no se ven exactamente en los resultados.

La primera conclusión que se puede extraer de los resultados es que la tensión Voc es la misma par un cable o encendedor que para N cables o encendedores asociados en paralelo. Por otro lado también se observa que esta tensión se multiplica por el número de bloque en serie. Para explicar mejor esto pondremos un ejemplo:

Si un material piezoeléctrico consigue una Voc de 1 V una asociación en paralelo de 40 obtendrá una Voc de 1V y una asociación de 100 unidades de ese material piezoeléctrico tendrá una Voc de 1V también. Si asociamos 5 unidades en serie de este material su Voc será de 5V y si se asocian 10 la Voc será de 10 V.

La segunda conclusión que se puede extraer ha partir de los resultados es el valor de Ro. En la asociación en paralelo la Ro de una unidad del material piezoeléctrico utilizado se divide por el número de unidades asociados en paralelo. En el caso de las asociaciones en serie la Ro se divide entre el número de unidades asociadas en paralelo que contiene cada bloque asociado en serie y se multiplica por el número de bloques asociado. Al igual que en el caso anterior este se ve mejor con un ejemplo:

Un material piezoeléctrico tiene una Ro de 100Ω, una asociación en paralelo de 50 unidades de este material tendrá una Ro de 2Ω, si la asociación en vez de 50 es de 100 unidades la Ro será de 1Ω. Si se asocian dos bloques de 50 unidades en serie la Ro de esta asociación será de 4Ω, si en vez de dos bloque se conectan 5 la Ro será de 10Ω.

Estas dos conclusiones que se han obtenidos son muy importantes porque obteniendo la caracterización del modelo de una unidad de cualquier material piezoeléctrico se puede saber el comportamiento de cualquier asociación de ese material piezoeléctrico sin necesidad de realizar las simulaciones de esta asociación. Estas conclusiones se han obtenido con una etapa rectificadora formada por un puente de diodos, mas adelante se comprobara si en esta conclusión afecta la etapa rectificadora.

3.3 Estudio del comportamiento de los materiales piezoeléctricos con etapa rectificadora formada por dos diodos.

3.3.1 Curva de regulación y potencia de un piezoeléctrico.

Después de estudiar los modelos con una etapa rectificadora de un puente de diodos se ha realizado el estudio de los mismos modelos con una etapa rectificadora de onda completa formada por dos diodos. Como en los casos anteriores el proceso es el mismo la única diferencia esta en la etapa rectificadora que ahorra dos diodos. Como se observa en la siguiente figura la única diferencia es la etapa rectificadora.

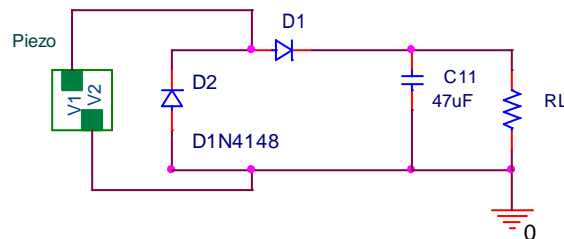


Figura 89: Circuito para obtener los valores de tensión final dos diodos.

En el circuito de la figura ambos diodos no pueden encontrarse simultáneamente en directa o en inversa, ya que las diferencias de potencial a las que están sometidos son de signo contrario; por tanto uno se encontrará polarizado inversamente y el otro directamente. El condensador interno del modelo del piezoeléctrico hace que pueda funcionar D2 y no represente un “corto” a la entrada alterna que es el piezoeléctrico. En el semiciclo negativo se carga el Condensador interno mediante D2 y en el positivo se descarga al C de salida mediante D1. Esta estructura se denomina dobladora.

Para la adquisición de datos se seguirá el mismo proceso que se siguió con la etapa rectificadora formada por un puente. Siguiendo el mismo orden el primer modelo que se va a estudiar es el del cable piezoeléctrico con amplificación mecánica. En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos para un cable con amplificación mecánica.

RL	Vmax	IL	PL
100KΩ	0.00584	5.84292E-08	3.41E-10
500KΩ	0.02878	5.75569E-08	1.66E-09
1MΩ	0.05674	5.67415E-08	3.22E-09
5MΩ	0.26703	5.34059E-08	1.43E-08
10MΩ	0.51020	5.10203E-08	2.6E-08
30KΩ	1.30900	4.36334E-08	5.71E-08
35MΩ	1.47071	4.20204E-08	6.18E-08
40MΩ	1.62991	4.07478E-08	6.64E-08
50MΩ	1.90902	3.81803E-08	7.29E-08
80 MΩ	2.57200	3.215E-08	8.27E-08
90 MΩ	2.74565	3.05072E-08	8.38E-08
100 MΩ	2.90082	2.90082E-08	8.41E-08
110 MΩ	3.05350	2.77591E-08	8.48E-08
120 MΩ	3.18510	2.65425E-08	8.45E-08
500 MΩ	5.03750	1.0075E-08	5.08E-08
C.abierto	6.25050	6.2505E-30	3.91E-29

Tabla 37: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable con amplificación mecánica con etapa rectificadora de dos diodos.

Como se comprobó anteriormente la pendiente de la curva de regulación tiene el mismo valor que la resistencia donde se produce la mayor transferencia de potencia. La pendiente de esta curva de regulación es la siguiente:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 120 \text{ M}\Omega) - V(R_L = 90 \text{ M}\Omega)}{I(R_L = 90 \text{ M}\Omega) - I(R_L = 120 \text{ M}\Omega)} = \frac{(3,1851 - 2,7456)}{(3,0507 - 2,6542) \cdot 10^{-8}} = 110,8 \text{ M}\Omega$$

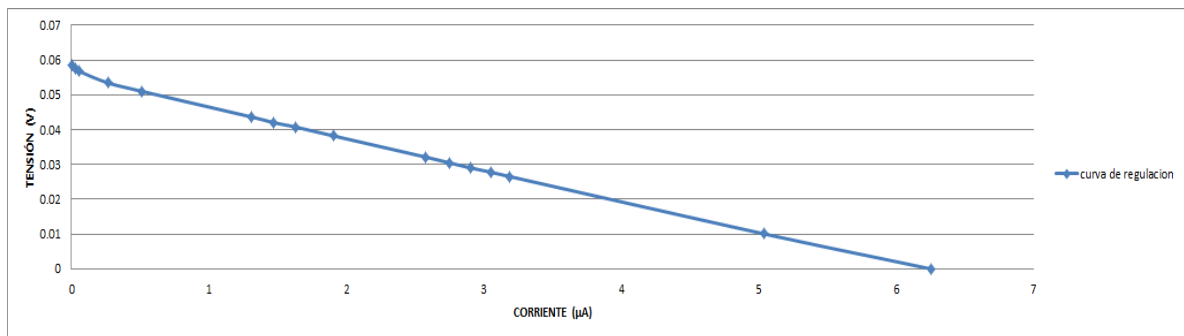


Figura 90: Curva de regulación cable piezoeléctrico con amplificación mecánica etapa rectificadora dos diodos

Como se puede comprobar en la siguiente figura el pico de máxima potencia se produce un poco por encima de 100 MΩ, por tanto, se cumple que el valor de la pendiente coincide con el valor de la resistencia donde se produce la mayor transferencia de potencia. Teniendo en cuenta el teorema de transferencia de máxima potencia la potencia entregada por este cable con amplificación mecánica y etapa rectificadora de dos diodos es la siguiente:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{oc}^2}{4 \cdot R_o} = \frac{6,2505^2}{4 \cdot 110,8 \cdot 10^6} = 88,15 \text{ nW}$$

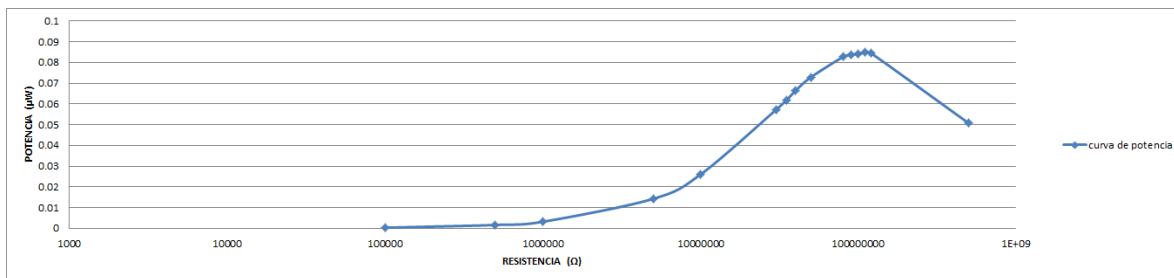


Figura 91: Curva de potencia cable piezoeléctrico con amplificación mecánica etapa rectificadora dos diodos

Siguiendo el mismo orden que en los estudios anteriores el siguiente modelo del que se han obtenido los valores para realizar la curva de regulación es el del cable piezoeléctrico sin amplificación mecánica. Los valores se muestran en la próxima tabla.

RL	Vmax	IL	PL
100KΩ	0.01015	1.0148E-08	1.02982E-10
70 MΩ	0.44581	6.36876E-09	2.83928E-09
80 MΩ	0.48343	6.04292E-09	2.92135E-09
90 MΩ	0.51759	5.75101E-09	2.97667E-09
100 MΩ	0.54845	5.48448E-09	3.00795E-09
110 MΩ	0.57667	5.24243E-09	3.02314E-09
120 MΩ	0.60263	5.02191E-09	3.02636E-09
130 MΩ	0.62626	4.81735E-09	3.01689E-09
1 GΩ	1.07006	1.07006E-09	1.14502E-09
C.abierto	1.19498	1.19498E-30	1.42797E-30

Tabla 38: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable sin amplificación mecánica con etapa rectificadora de dos diodos.

A diferencia del cable con amplificación mecánica el estudio se ha centrado mas en la zona de valores de la resistencia de carga donde se produce una mayor transferencia de potencia. El valor de la pendiente de la curva de regulación es el siguiente:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 120 \text{ M}\Omega) - V(R_L = 80 \text{ M}\Omega)}{I(R_L = 80 \text{ M}\Omega) - I(R_L = 120 \text{ M}\Omega)} = \frac{(0,62626 - 0,48343)}{(5,0219 - 6,0429) \cdot 10^{-9}} = 116,7 \text{ M}\Omega$$

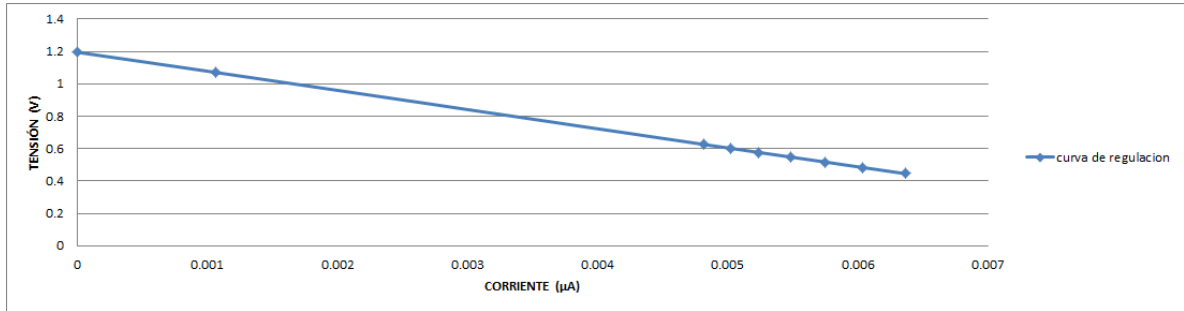


Figura 92: Curva de regulación cable piezoeléctrico sin amplificación mecánica etapa rectificadora dos diodos

La potencia máxima que puede dar este modelo con esta etapa rectificadora se produce para un valor de resistencia de carga de 116,7 MΩ. El valor de esta potencia es el siguiente:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{oc}^2}{4 \cdot R_o} = \frac{1,19498^2}{4 \cdot 116,7 \cdot 10^6} = 3,05 \text{ nW}$$

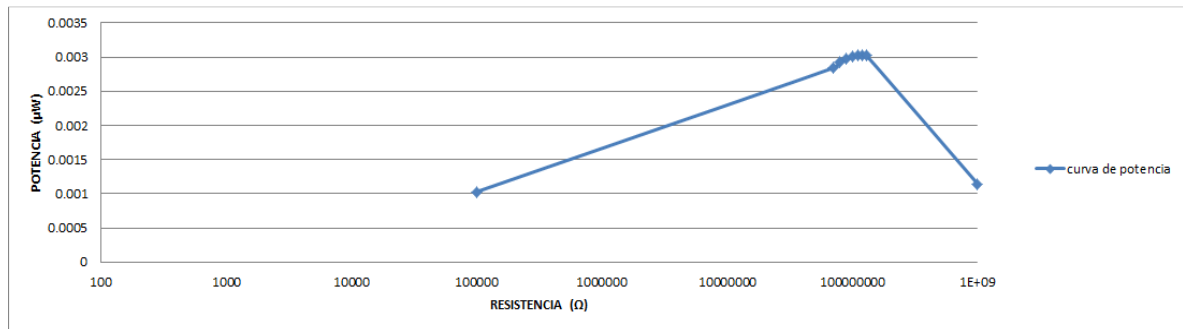


Figura 93: Curva de potencia cable piezoeléctrico sin amplificación mecánica etapa rectificadora dos diodos

Como se puede ver en la figura de arriba se sigue cumpliendo que el máximo pico de potencia se produce en un valor un poco por encima de 100 MΩ, ese punto es 116,7 MΩ.

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos para el modelo del cable piezoeléctrico en el exterior al aire.

RL	Vmax	IL	PL
10 MΩ	3.6894	3.6894E-07	1.36117E-06
40 MΩ	11.6885	2.92214E-07	3.41555E-06
50 MΩ	13.7398	2.74796E-07	3.77564E-06
60 MΩ	15.5632	2.59387E-07	4.03689E-06
70 MΩ	17.1925	2.45608E-07	4.22262E-06
80 MΩ	18.6655	2.33319E-07	4.35502E-06
90 MΩ	19.9958	2.22175E-07	4.44257E-06
100 MΩ	21.2006	2.12006E-07	4.49467E-06
110 MΩ	22.3278	2.0298E-07	4.53209E-06
120 MΩ	23.4136	1.95113E-07	4.5683E-06
130 MΩ	24.3192	1.87071E-07	4.54941E-06
140 MΩ	25.1514	1.79653E-07	4.51854E-06
150 MΩ	26.0138	1.73425E-07	4.51145E-06
1 GΩ	46.4532	4.64532E-08	2.1579E-06
C.abierto	52.0492	5.20492E-29	2.70912E-27

Tabla 39: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable en el exterior al aire con etapa rectificadora de dos diodos.

La pendiente de la curva de regulación es:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 110 \text{ M}\Omega) - V(R_L = 70 \text{ M}\Omega)}{I(R_L = 70 \text{ M}\Omega) - I(R_L = 110 \text{ M}\Omega)} = \frac{(22,3278 - 17,1925)}{(2,45608 - 2,0298) \cdot 10^{-7}} = 120,4 \text{ M}\Omega$$

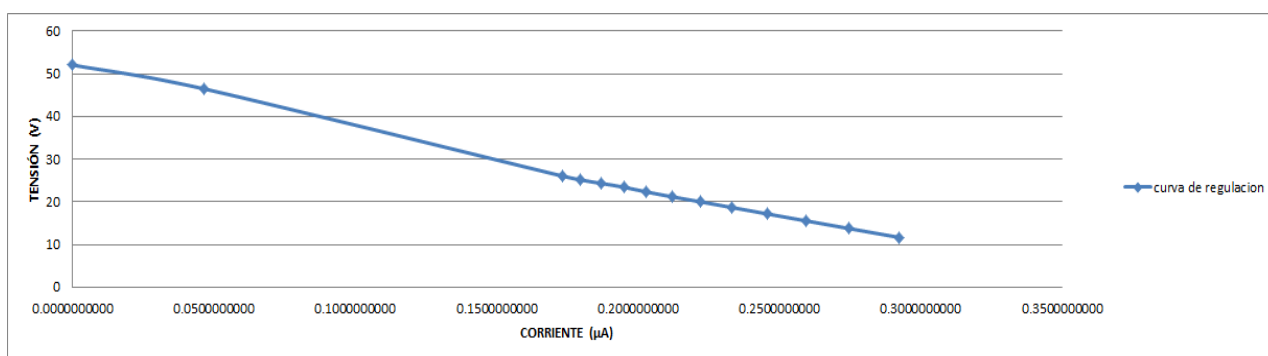


Figura 94: Curva de regulación cable piezoeléctrico en el exterior al aire etapa rectificadora dos diodos

La potencia máxima entregada por este cable al en el exterior es la siguiente:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O} = \frac{52,0492^2}{4 \cdot 120,4 \cdot 10^6} = 5,62 \text{ }\mu\text{W}$$

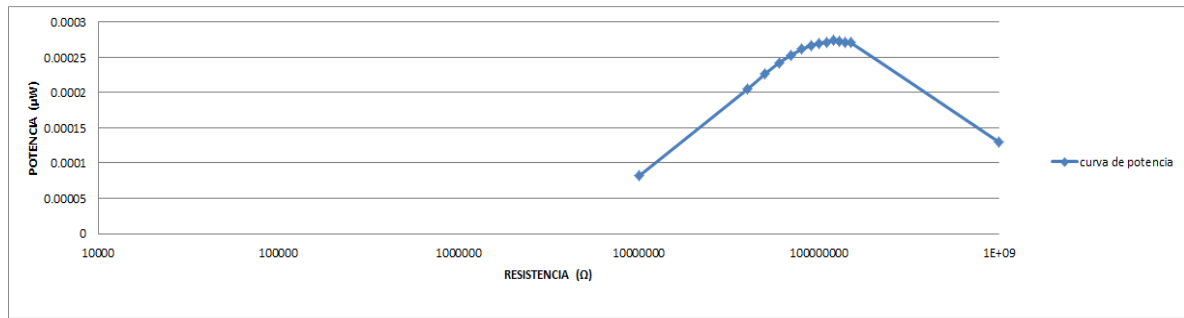


Figura 95: Curva de potencia cable piezoeléctrico en el exterior al aire etapa rectificadora dos diodos

El último modelo del cable piezoeléctrico estudiado es el del exterior enterrado. En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos para la construcción de sus curvas.

RL	Vmax	IL	PL
10 MΩ	0.32969	3.29694E-08	1.08698E-08
70 MΩ	1.35271	1.93245E-08	2.61405E-08
80 MΩ	1.45092	1.81365E-08	2.63145E-08
90 MΩ	1.53702	1.7078E-08	2.62492E-08
100 MΩ	1.61592	1.61592E-08	2.61119E-08
110 MΩ	1.68462	1.53147E-08	2.57995E-08
120 MΩ	1.74653	1.45544E-08	2.54197E-08
130 MΩ	1.80253	1.38656E-08	2.49933E-08
500 MΩ	2.61834	5.23668E-09	1.37114E-08
C.abierto	3.05050	3.0505E-30	9.30555E-30

Tabla 40: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable en el exterior enterrado con etapa rectificadora de dos diodos.

El valor de la pendiente de la curva de regulación es:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 120 \text{ M}\Omega) - V(R_L = 80 \text{ M}\Omega)}{I(R_L = 80 \text{ M}\Omega) - I(R_L = 120 \text{ M}\Omega)} = \frac{(1,74653 - 1,45092)}{(1,81365 - 1,45544) \cdot 10^{-8}} = 82,5 \text{ M}\Omega$$

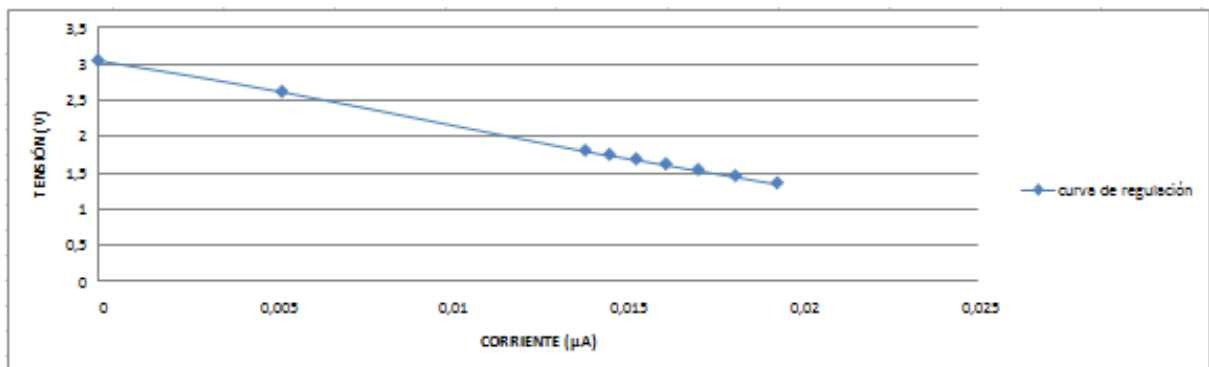


Figura 96: Curva de regulación cable piezoeléctrico en el exterior enterrado etapa rectificadora dos diodos.

La potencia máxima que puede dar el modelo del cable piezoeléctrico en el exterior enterrado con la etapa rectificadora de dos diodos es:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O} = \frac{3,0505^2}{4 \cdot 82,5 \cdot 10^6} = 28,2 \text{ nW}$$

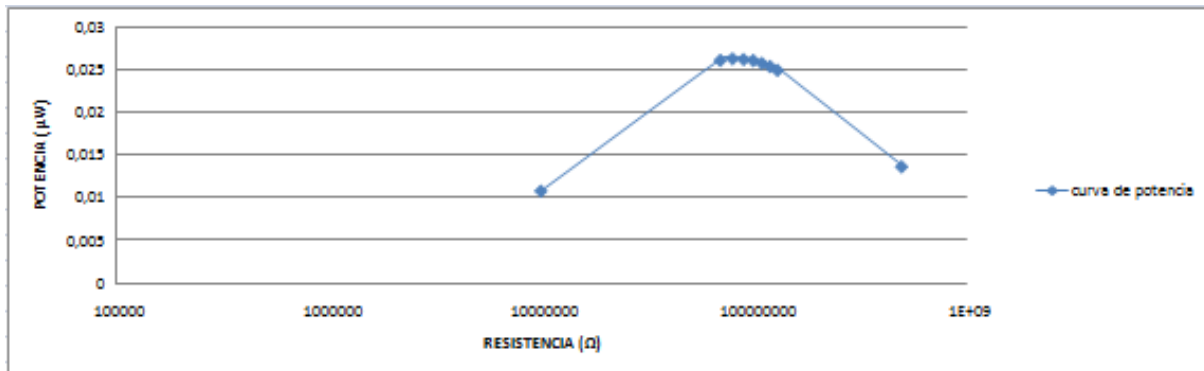


Figura 97: Curva de potencia cable piezoeléctrico en el exterior enterrado etapa rectificadora dos diodos.

El último modelo que se ha estudiado es el modelo del material piezoeléctrico que se encuentra dentro de un encendedor comercial. Para poder obtener los valores para la creación de la curva de regulación y potencia es necesario modificar el circuito con el que se obtienen. Como la tensión supera la tensión de ruptura del diodo 1N4148 que es de 100v, se usan diodos 1N4007. Este diodo tiene una tensión de ruptura de 1000v pero el modelo de Orcad soporta hasta 1500V. La tensión máxima que nos vamos a encontrar es superior a 1500v se añaden diodos en serie para que la tensión de ruptura de esa rama sean la suma de las tensiones de ruptura, cada rama funciona como si estuviera formada por un único diodo con esa tensión de ruptura. En el circuito de la figura esta tensión es de 6000V aunque en la realidad sería de 4000v.

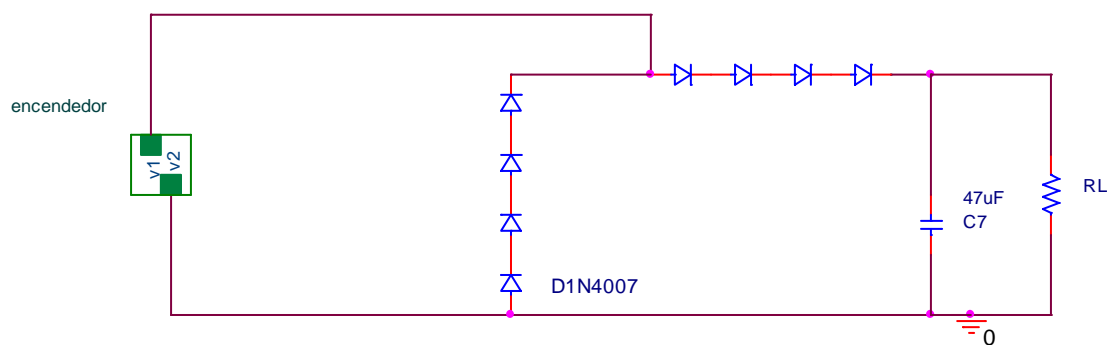


Figura 98: Circuito para obtener los valores de tensión final del encendedor con etapa rectificadora de dos diodos.

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos para el material piezoeléctrico de un encendedor comercial.

RL	Vmax	IL	PL
6500 MΩ	2187.80	3.36584E-07	0.00073638
6600 MΩ	2205.00	3.34091E-07	0.00073667
6700 MΩ	2222.30	3.31686E-07	0.00073711
6800 MΩ	2239.25	3.29301E-07	0.00073739
6900 MΩ	2256.00	3.26956E-07	0.00073761
7000 MΩ	2272.20	3.246E-07	0.00073755
7100 MΩ	2288.00	3.22253E-07	0.00073731
7200 MΩ	2303.40	3.19916E-07	0.00073689
C.abierto	4788.58	4.78858E-27	2.293E-23

Tabla 41: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de encendedor comercial con etapa rectificadora de dos diodos.

La pendiente de la curva de regulación es:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 7100 \text{ M}\Omega) - V(R_L = 6800 \text{ M}\Omega)}{I(R_L = 6800 \text{ M}\Omega) - I(R_L = 7100 \text{ M}\Omega)} = \frac{(2288 - 2239,25)}{(3,29301 - 3,22253) \cdot 10^{-7}} = 6917 \text{ M}\Omega$$

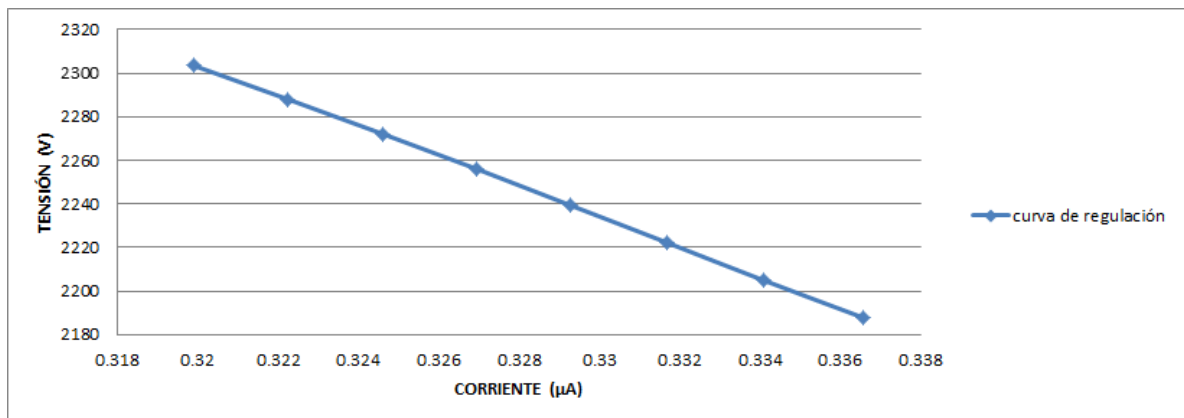


Figura 99: Curva de regulación encendedor comercial etapa rectificadora dos diodos.

La potencia máxima que puede entregar el material piezoeléctrico de un encendedor comercial con esta etapa rectificadora es:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{oc}^2}{4 \cdot R_o} = \frac{4788,58^2}{4 \cdot 6917 \cdot 10^6} = 828,7 \mu W$$

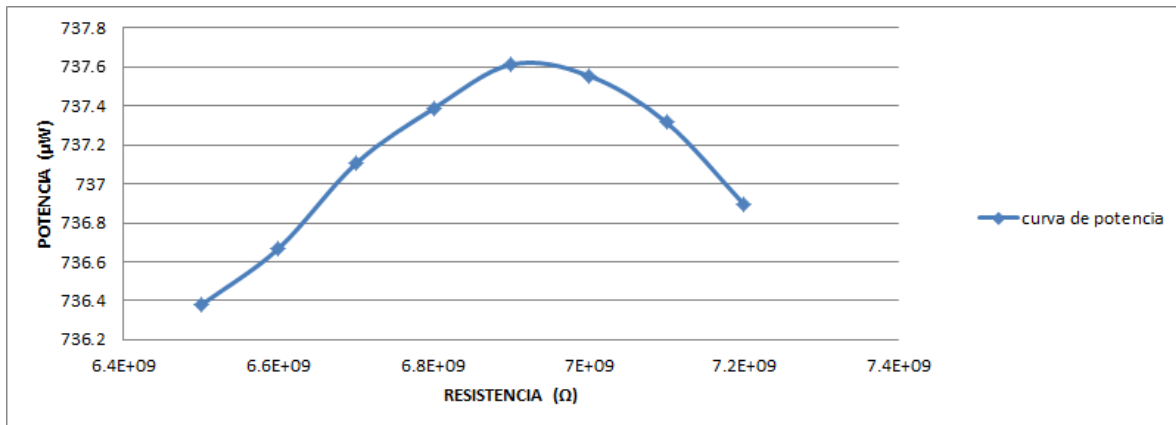


Figura 100: Curva de potencia encendedor comercial etapa rectificadora dos diodos.

3.3.2 Curva de regulación y potencia de 80 cables asociados en paralelo.

Como se hiciera con la etapa rectificadora formada por un puente de diodos, se va a realizar el estudio del efecto de 80 cables piezoeléctricos o encendedores en paralelo cada uno con su propia etapa rectificadora formada por dos diodos.

El procedimiento es el mismo que se ha venido llevando a cabo durante este proyecto. Hay que tener en cuenta que el circuito para adquirir los datos para el material piezoeléctrico del encendedor es diferente al de los cables piezoeléctricos, el circuito es el mismo que se comento para un cable. Se va a seguir el mismo orden que se ha llevado hasta ahora. En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos para la realización de la curva de regulación y potencia de 80 cables piezoeléctricos en paralelo.

RL	Vmax	IL	PL
1.1 MΩ	2.70751	2.46137E-06	6.6642E-06
1.2 MΩ	2.83883	2.36569E-06	6.7158E-06
1.3 MΩ	2.95984	2.2768E-06	6.73895E-06
1.4 MΩ	3.06988	2.19277E-06	6.73152E-06
1.5 MΩ	3.17475	2.1165E-06	6.71935E-06
1.6 MΩ	3.27508	2.04692E-06	6.70384E-06
1.7 MΩ	3.36625	1.98015E-06	6.66569E-06
C.Abierto	6.22165	6.22165E-30	3.8709E-29

Tabla 42: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 cables con amplificación mecánica con etapa rectificadora de 2 diodos.

Como se ha venido siguiendo el estudio se centra en los valores de RL donde se produce una mayor transferencia de potencia. Como se ha visto hasta ahora el valor de RL donde se produce la mayor transferencia de potencia es igual al valor de la pendiente de regulación. En este caso el valor de esa pendiente es:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 1,6 \text{ M}\Omega) - V(R_L = 1,2 \text{ M}\Omega)}{I(R_L = 1,2 \text{ M}\Omega) - I(R_L = 1,6 \text{ M}\Omega)} = \frac{(3,275 - 2,83883)}{(2,36569 - 2,04692) \cdot 10^{-6}} = 1,36 \text{ M}\Omega$$

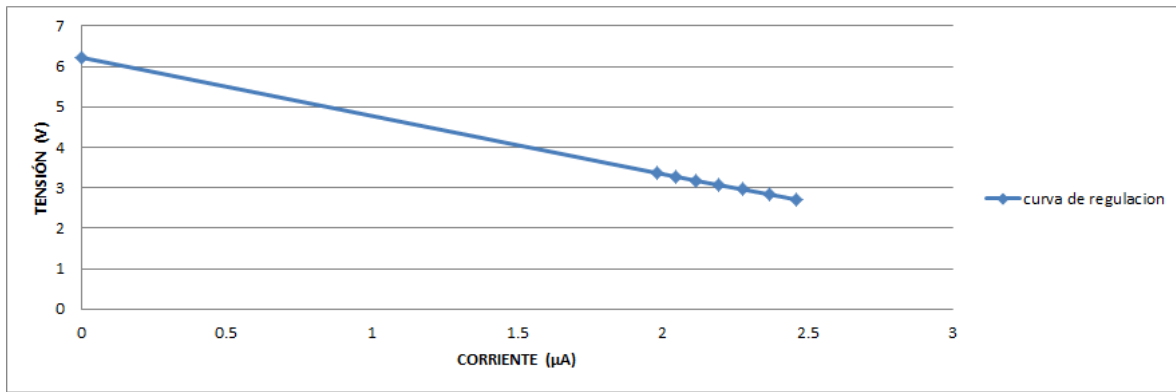


Figura 101: Curva de regulación 80 cables piezoeléctricos con amplificación mecánica en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos.

La potencia máxima que se puede obtener de este modelo con esta asociación es la siguiente:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O} = \frac{6,22165^2}{4 \cdot 1,36 \cdot 10^6} = 7,11 \mu W$$

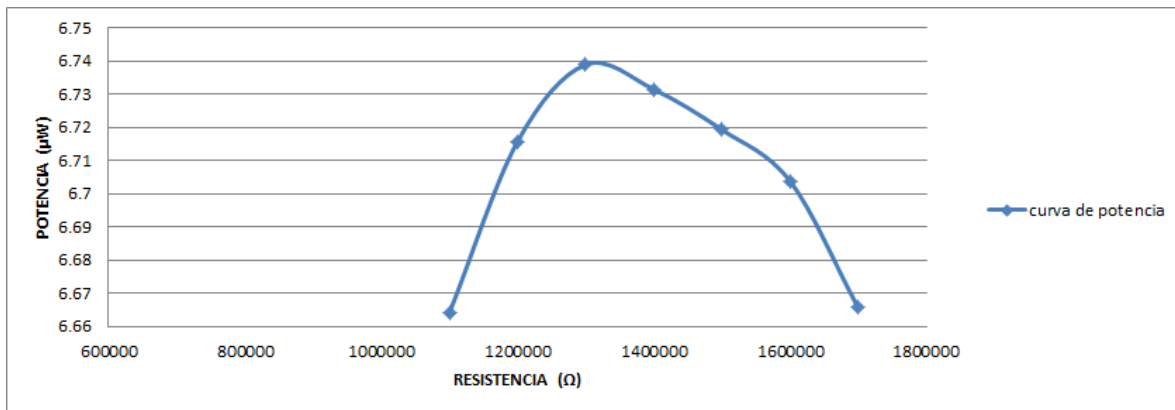


Figura 102: Curva de potencia 80 cables piezoeléctricos con amplificación mecánica en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos.

Siguiendo el mismo orden establecido anteriormente se han obtenido los valores para el modelo del cable piezoeléctrico sin amplificación mecánica, estos valores se muestran en la siguiente tabla.

RL	Vmax	IL	PL
1.2 MΩ	0.53977	4.49807E-07	2.42791E-07
1.3 MΩ	0.56364	4.33571E-07	2.44379E-07
1.4 MΩ	0.58569	4.18348E-07	2.45021E-07
1.5 MΩ	0.60650	4.04331E-07	2.45225E-07
1.6 MΩ	0.62583	3.91143E-07	2.44788E-07
1.7 MΩ	0.64393	3.78782E-07	2.43909E-07
1.8 MΩ	0.66098	3.67211E-07	2.42719E-07
C.Abierto	1.20231	1.20231E-30	1.44556E-30

Tabla 43: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 cables sin amplificación mecánica con etapa rectificadora de 2 diodos.

El valor de la pendiente en este caso es:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 1,7 \text{ M}\Omega) - V(R_L = 1,3 \text{ M}\Omega)}{I(R_L = 1,3 \text{ M}\Omega) - I(R_L = 1,7 \text{ M}\Omega)} = \frac{(0,64393 - 0,56364)}{(4,33571 - 3,78782) \cdot 10^{-7}} = 1,46 \text{ M}\Omega$$

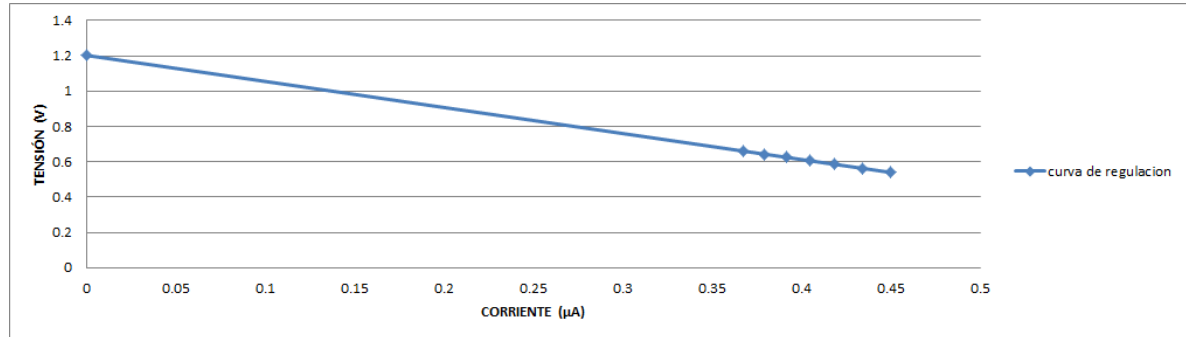


Figura 103: Curva de regulación 80 cables piezoeléctricos sin amplificación mecánica en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos.

La potencia máxima que se puede obtener de este modelo con esta asociación es la siguiente:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O} = \frac{1,20231^2}{4 \cdot 1,46 \cdot 10^6} = 0,247 \text{ μW}$$

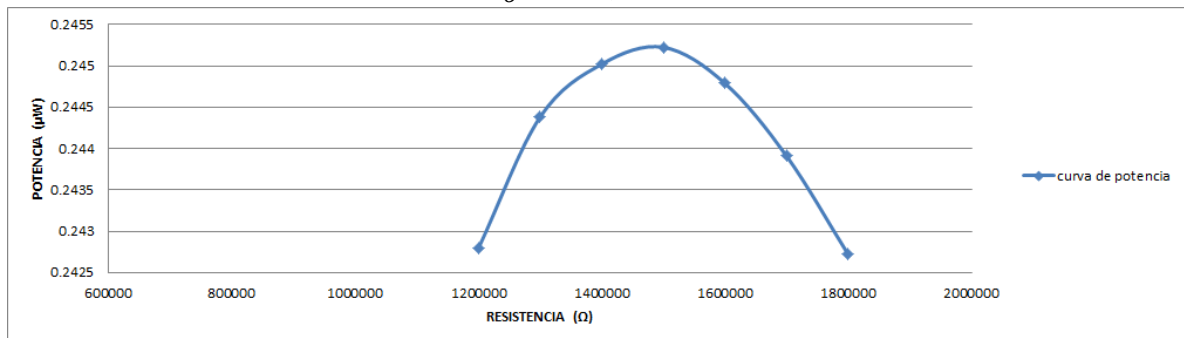


Figura 104: Curva de potencia 80 cables piezoeléctricos sin amplificación mecánica en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos.

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos para el modelo del cable piezoeléctrico en el exterior al aire.

RL	Vmax	IL	PL
1.2 MΩ	20.36967	1.69747E-05	0.000345769
1.3 MΩ	21.28046	1.63696E-05	0.000348352
1.4 MΩ	22.12670	1.58048E-05	0.000349708
1.5 MΩ	22.91680	1.52779E-05	0.00035012
1.6 MΩ	23.65545	1.47847E-05	0.000349738
1.7 MΩ	24.34265	1.43192E-05	0.000348567
1.8 MΩ	24.99765	1.38876E-05	0.000347157
C.Abierto	51.4	5.14E-29	2.64196E-27

Tabla 44: valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 cables en el exterior al aire con etapa rectificadora de 2 diodos.

La pendiente de la curva de regulación es:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 1,6 \text{ M}\Omega) - V(R_L = 1,3 \text{ M}\Omega)}{I(R_L = 1,3 \text{ M}\Omega) - I(R_L = 1,6 \text{ M}\Omega)} = \frac{(23,65545 - 21,28046)}{(1,63696 - 1,47847) \cdot 10^{-5}} = 1,49 \text{ M}\Omega$$

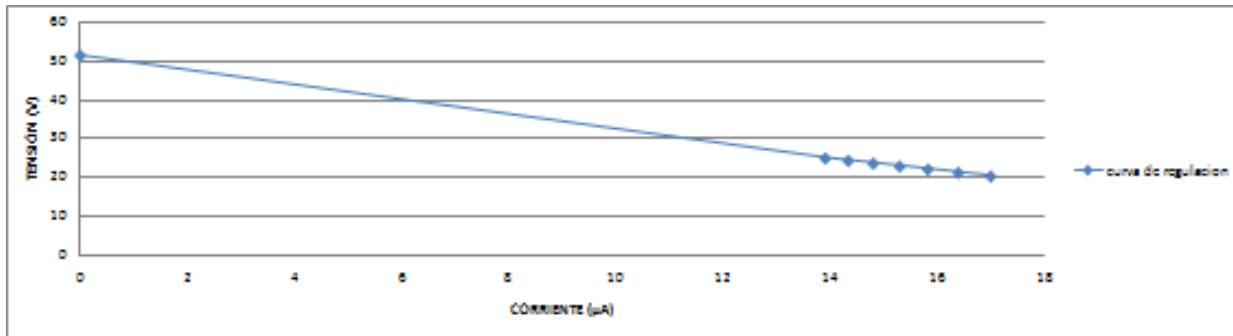


Figura 105: Curva de regulación 80 cables piezoeléctricos en el exterior al aire en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos.

La potencia máxima que se puede obtener con este modelo y esta asociación es:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{oc}^2}{4 \cdot R_o} = \frac{51,4^2}{4 \cdot 1,49 \cdot 10^6} = 440 \text{ μW}$$

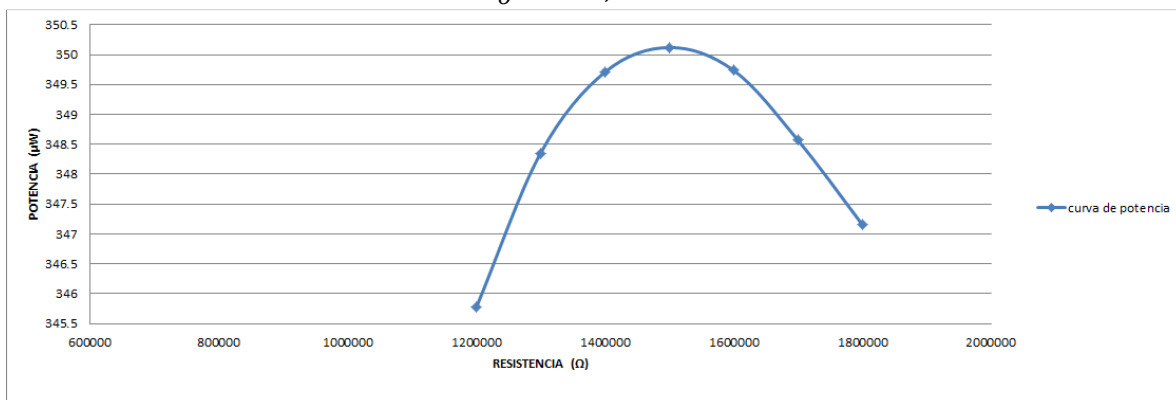


Figura 106: Curva de potencia 80 cables piezoeléctricos en el exterior al aire en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos.

El último modelo del cable piezoeléctrico del que se han obtenido los resultados es del modelo exterior enterrado. Los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

RL	Vmax	IL	PL
600KΩ	1.10855	1.84758E-06	2.04812E-06
700KΩ	1.20578	1.72255E-06	2.07702E-06
800KΩ	1.29528	1.6191E-06	2.09719E-06
900KΩ	1.37701	1.53001E-06	2.10683E-06
1 MΩ	1.45301	1.45301E-06	2.11123E-06
1.1 MΩ	1.52268	1.38425E-06	2.10777E-06
1.2 MΩ	1.58613	1.32177E-06	2.0965E-06
1.3 MΩ	1.64438	1.26491E-06	2.07999E-06
1.4 MΩ	1.69770	1.21264E-06	2.0587E-06
C.Abierto	3.05140	3.0514E-30	9.31104E-30

Tabla 45: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 cables en el exterior enterrado con etapa rectificadora de 2 diodos.

La pendiente de la curva de regulación es:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 1,4 \text{ M}\Omega) - V(R_L = 1 \text{ M}\Omega)}{I(R_L = 1 \text{ M}\Omega) - I(R_L = 1,4 \text{ M}\Omega)} = \frac{(1,6977 - 1,45301)}{(1,45301 - 1,21264) \cdot 10^{-6}} = 1,01 \text{ M}\Omega$$

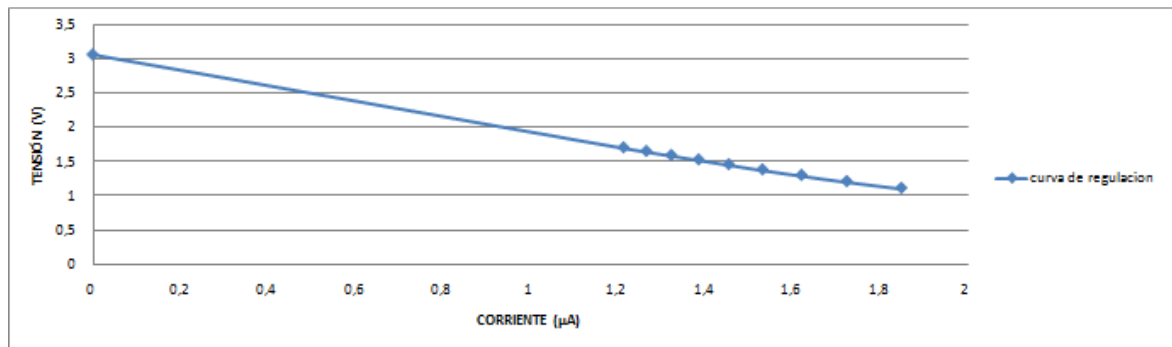


Figura 107: Curva de regulación 80 cables piezoeléctricos en el exterior enterrado en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos.

La máxima potencia que se puede obtener de esta asociación es la siguiente:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{oc}^2}{4 \cdot R_o} = \frac{3,0514^2}{4 \cdot 1,01 \cdot 10^6} = 2,30 \mu\text{W}$$

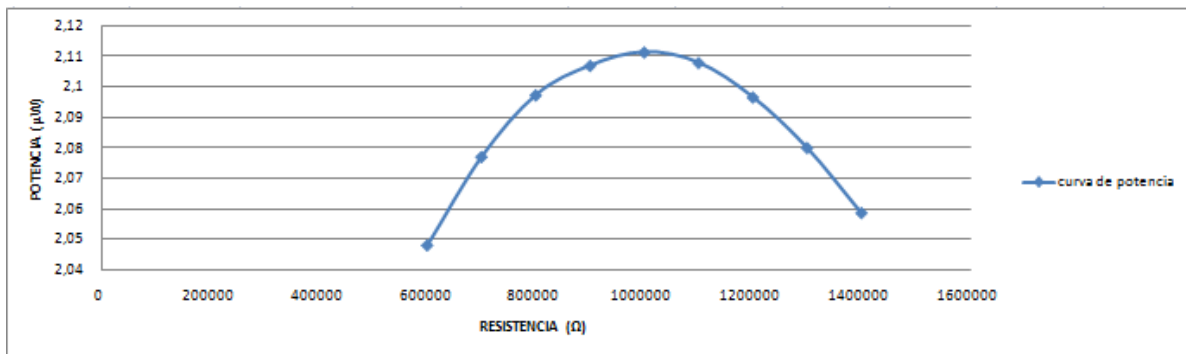


Figura 108: Curva de potencia 80 cables piezoeléctricos en el exterior enterrado en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos.

Por último se ha estudiado el modelo del material piezoeléctrico de un encendedor comercial, los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

RL	Vmax	IL	PL
60 MΩ	1854.27213	3.09045E-05	0.05730542
70 MΩ	2024.38629	2.89198E-05	0.05854486
80 MΩ	2175.09319	2.71887E-05	0.05913788
90 MΩ	2307.69844	2.56411E-05	0.05917191
100 MΩ	2424.60418	2.4246E-05	0.05878705
110 MΩ	2530.20881	2.30019E-05	0.05819961
120 MΩ	2626.79976	2.189E-05	0.05750064
C.abierto	4758.99316	4.75899E-27	2.2648E-23

Tabla 46: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de 80 encendedores comerciales con etapa rectificadora de dos diodos.

El valor de la pendiente de la curva de regulación es:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 100 \text{ M}\Omega) - V(R_L = 70 \text{ M}\Omega)}{I(R_L = 70 \text{ M}\Omega) - I(R_L = 100 \text{ M}\Omega)} = \frac{(2424.64 - 2024,38)}{(2,89198 - 2,4246) \cdot 10^{-5}} = 85,6 \text{ M}\Omega$$

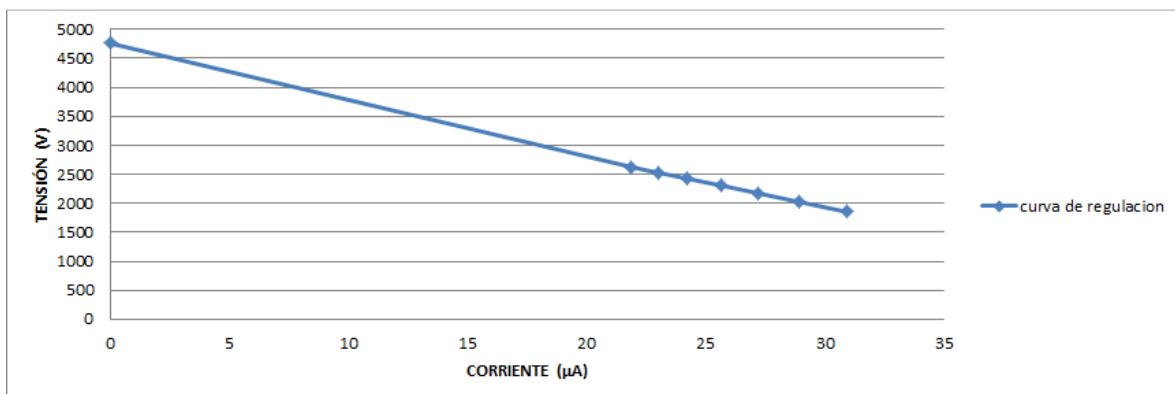


Figura 109: Curva de regulación 80 encendedores comerciales en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos.

La potencia máxima que se puede obtener del material piezoeléctrico de un encendedor comercial con esta asociación es la siguiente:

$$P_{Máx} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_o} = \frac{4758,99^2}{4 \cdot 85,6 \cdot 10^6} = 66,14 \text{ mW}$$

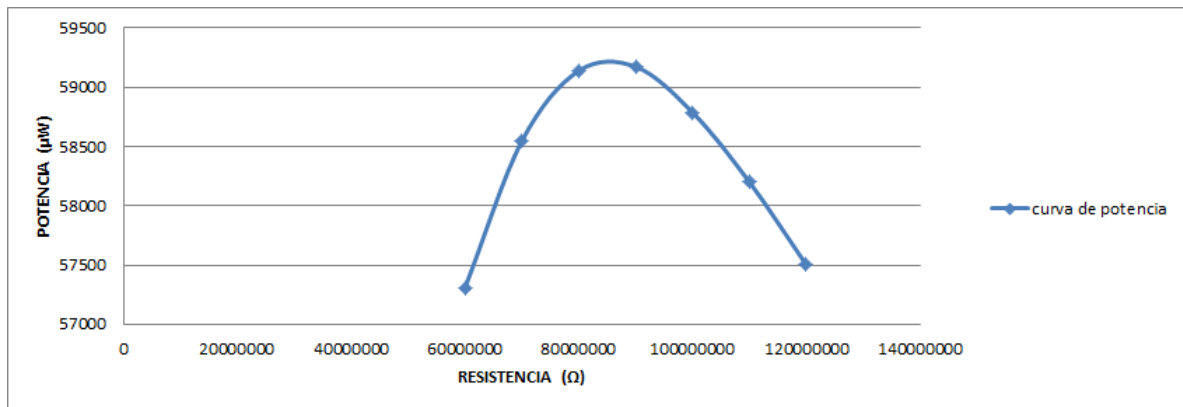


Figura 110: Curva de Potencia 80 encendedores comerciales en paralelo con etapa rectificadora 2 diodos

3.3.3 Comparación de resultados.

Una vez obtenido todos los resultados de los modelos estudiados, en este apartado se va a estudiarlos y sacar conclusiones. En primer lugar se estudiarán solo los resultados obtenidos con la etapa rectificadora de dos diodos para comprobar que se sigue cumpliendo las conclusiones que se obtuvieron con la etapa rectificadora formada por un puente de diodos. En segundo lugar se compararán los resultados obtenidos con las dos etapas rectificadoras.

En la siguiente tabla se pueden observar todos los resultados obtenidos de todos los modelos con las dos asociaciones estudiadas con la etapa rectificadora de dos diodos:

asociacion	Voc	R0	Pmax	comparacion en veces con un cable		
				Voc	R0	Pmax
1 cable amplificacion mecanica	6.2505 v	110.8 MΩ	88.15 nW			
80 cables amplificacion mecanica	6.22165 v	1.36 MΩ	7.11 μW	1.00	81.47	80.66
1 cable sin amplificacion mecanica	1.19498 v	116.7 MΩ	3.05 nW			
80 cables sin amplificacion mecanica	1.20231 v	1.46 MΩ	247 nW	0.99	79.93	80.98
1 cable en el exterior al aire	52.0492 v	120.4 MΩ	5.62 μW			
80 cables en el exterior al aire	51.4 v	1.49 MΩ	440 μW	1.01	80.81	78.29
1 cable en el exterior enterrado	3.0505 v	82.5 MΩ	28.2 nW			
80 cables en el exterior enterrado	3.0514 v	1.01 MΩ	2.3 μW	1.00	81.68	81.56
1 encendedor comercial	4788.58 v	6917 MΩ	828.7 μW			
80 encendedores comerciales	4758.99 v	85.6 MΩ	66.14 mW	1.01	80.81	79.81

Tabla 47: comparación de los resultados de todos los modelos con etapa rectificadora de dos diodos.

Como se puede observar en la tabla se sigue cumpliendo las conclusiones obtenidas con etapa rectificadora de un puente de diodos. La primera que la tensión Voc es la misma para un cable que para N cables asociados en paralelo y que Ro se divide entre el número de cables asociados, esto lo que provoca que la potencia que se puede conseguir se multiplica por el número de cables asociados.

Una vez comprobado que se cumplen las conclusiones sacadas en apartados anteriores se va a estudiar el efecto que produce utilizar la etapa de rectificación formada por un puente de diodos o una etapa de rectificación de onda completa.

En la siguiente tabla se muestra una comparación de los datos obtenidos para un cable con los diferentes modelos y un encendedor y las dos etapas rectificadoras. La comparación solo se hace con un cable porque a la vista de las conclusiones obtenidas hasta ahora caracterizando una unidad de un material piezoeléctrico podemos saber el comportamiento de cualquier asociación.

modelo	etapa	Voc	R0	Pmax	comparacion en veces con puente		
					Voc	R0	Pmax
cable con amplificacion mecanica	puente	3.04 v	27.707 MΩ	83 nW			
cable con amplificacion mecanica	dos diodos	6.2505 v	110.8 MΩ	88.15 nW	2.06	4.00	0.94
cable sin amplificacion mecanica	puente	0.5627 v	25.105 MΩ	3.15 nW			
cable sin amplificacion mecanica	dos diodos	1.19498 v	116.7 MΩ	3.05 nW	2.12	4.65	1.03
cable exterior al aire	puente	25.584 v	29.847 MΩ	5.48 μW			
cable exterior al aire	dos diodos	52.0492 v	120.4 MΩ	5.62 μW	2.03	4.03	0.98
cable exterior enterrado	puente	1.4724 v	20.55 MΩ	26.37 nW			
cable exterior enterrado	dos diodos	3.0505 v	82.5 MΩ	28.2 nW	2.07	4.01	0.94
encendedor comercial	puente	2395.03 v	1714.5 MΩ	836 μW			
encendedor comercial	dos diodos	4788.58 v	6917 MΩ	828.7 μW	2.00	4.03	1.01

Tabla 48: Comparación de los resultados de todos los modelos con las dos etapas rectificadoras.

A la vista de los resultados obtenidos con las dos etapas rectificadoras se puede asegurar que con la etapa compuesta por dos diodos la tensión Voc es el doble que la que se obtiene con la etapa formada por un puente. Por otro lado la Ro es cuatro veces más grande con la etapa rectificadora formada por dos diodos que la que se obtiene con la etapa formada por un puente. Esto hace que la potencia que se obtiene sea la misma para las dos etapas rectificadoras. A continuación se muestra la formula para que se vea claramente que la potencia que se puede conseguir utilizando cualquiera de las dos etapas es la misma.

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC_{puente}}^2}{4 \cdot R_{O_{puente}}} = \frac{V_{OC_{dos\ diodos}}^2}{4 \cdot R_{O_{dos\ diodos}}} = \frac{(2 \cdot V_{OC_{puente}})^2}{4 \cdot 4 \cdot R_{O_{puente}}} = \frac{4 \cdot V_{OC_{puente}}^2}{4 \cdot 4 \cdot R_{O_{puente}}} = \frac{V_{OC_{puente}}^2}{4 \cdot R_{O_{puente}}}$$

La conclusión que se puede extraer de los resultados es que utilizando cualquiera de estas dos etapas rectificadoras se obtiene la misma potencia, pero depende de la que se utilice se tiene unas ventajas u otras. La principal ventaja de utilizar la etapa formada por dos diodos es la reducción en la mitad de la cantidad de diodos usados, esto puede ser muy importante si el número de materiales piezoeléctricos es muy alto, para ahorrar costes y espacio. Esta etapa rectificadora tiene dos desventajas importantes. La primera es que la Voc se multiplica por dos esto puede ser importante o no dependiendo del material piezoeléctrico que estemos utilizando y del circuito regulador que añadamos después del condensador. Por ejemplo para un encendedor comercial esta desventaja es muy importante porque las tensiones que se pueden obtener son muy altas. La segunda desventaja que tiene esta etapa rectificadora es el valor de la resistencia donde se produce la mayor transferencia de potencia Ro.

3.4 Estudio del comportamiento de los materiales piezoeléctricos con amplificación.

3.4.1 Curvas de regulación y potencia amplificadas.

Una vez visto el efecto de las dos etapas rectificadoras estudiadas se va a seguir con el estudio del efecto de la amplificación de las señales. Se han estudiado tres casos para cada modelo creado hasta el momento, estos tres casos son: amplificación por 10, 100 y 1000. Las señales han sido creadas por el programa que se elaboró con LabVIEW debido a la imposibilidad de poder amplificar las señales por estos factores de forma real. Para conseguir estas señales se indica en el panel de control en la opción de factor de multiplicación 10, 100 y 1000 para obtener las tres señales. Al observar los datos de los armónicos se puede comprobar que el número de armónicos para reconstruir la señal no aumenta y lo único que cambia es el valor de la amplitud, en el ANEXO se muestran los armónicos de algunas de las señales creadas, debido a la gran cantidad de espacio que ocupan no se han puesto los armónicos de todas las señales creadas. En las tablas del ANEXO hay que tener en cuenta que algunas no empiezan por la frecuencia fundamental debido a que el programa diseñado extrae los armónicos más significativos no los primeros.

Para realizar el estudio se ha seguido el mismo procedimiento que se ha seguido hasta ahora. La diferencia que existe con los estudios anteriores es el circuito para obtener los valores de cada modelo. El circuito es el mismo la única diferencia es el modelo de los diodos utilizados debido a las tensiones que se esperan, los diodos que se han utilizado son los 1N4007 que tienen una tensión umbral de 1000V pero el modelo de Orcad está diseñado con una tensión umbral de 1500V. Para que la tensión sea menor se decidió utilizar la etapa rectificadora formada por un puente de diodos que como se comprobó antes la tensión máxima obtenida es la mitad que con la otra etapa rectificadora. Como las tensiones serán grandes cada rama del puente de diodos estará formada por varios diodos en serie para que la tensión umbral sea la suma de los diodos. En la siguiente figura se muestra el circuito utilizado para obtener los datos del modelo del cable piezoeléctrico con amplificación mecánica multiplicado por 1000, como se observa cada rama del puente está formada por 3 diodos dando lugar a una tensión VRRM total de 4500 V. El número de diodos variará dependiendo del modelo que estemos estudiando debido a que la tensión es diferente, el peor

de los casos utilizando cables piezoeléctricos es el del modelo exterior al aire por 1000 en el que cada rama estará formada por 18 diodos en el Orcad aunque en realidad serian 26.

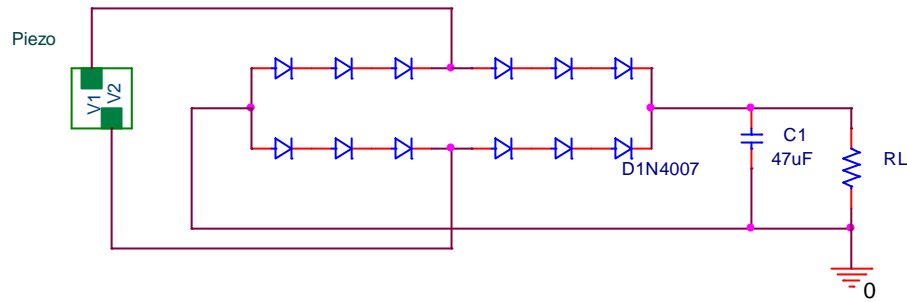


Figura 111: Circuito para la obtención de los valores para el modelo cable con amplificación x1000.

Se ha seguido el mismo orden que en los anteriores estudios. En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos para el modelo del cable piezoeléctrico con amplificación mecánica para los tres casos de amplificación x10, x100 y x1000.

RL	Vmax (x10)	IL (x10)	Pmax (x10)	Vmax (x100)	IL (x100)	Pmax (x100)	Vmax (x1000)	IL (x1000)	Pmax (x1000)
100kΩ	0.12364	1.23644E-06	1.52878E-07	1.27190	1.2719E-05	1.61772E-05	12.81756	0.000128176	0.001642898
1MΩ	1.16888	1.16888E-06	1.36627E-06	11.89406	1.18941E-05	0.000141469	119.42492	0.000119425	0.014262311
10MΩ	8.88593	8.88593E-07	7.89598E-06	90.41532	9.04153E-06	0.000817493	906.34796	9.06348E-05	0.082146662
20MΩ	14.05814	7.02907E-07	9.88156E-06	143.06264	7.15313E-06	0.001023346	1435.80624	7.17903E-05	0.103076978
25MΩ	15.91131	6.36452E-07	1.01268E-05	162.31801	6.49272E-06	0.001053885	1622.71796	6.49087E-05	0.105328543
30MΩ	17.44327	5.81442E-07	1.01423E-05	177.48317	5.91611E-06	0.001050009	1781.57837	5.93859E-05	0.105800716
35MΩ	18.73462	5.35275E-07	1.00282E-05	191.13755	5.46107E-06	0.001043816	1911.07897	5.46023E-05	0.104349223
40MΩ	19.83468	4.95867E-07	9.83536E-06	202.36774	5.05919E-06	0.001023818	2024.35330	5.06088E-05	0.102450157
50MΩ	21.61019	4.32204E-07	9.34E-06	219.99570	4.39991E-06	0.000967962	2205.69480	4.41139E-05	0.097301791
100MΩ	26.32730	2.63273E-07	6.93127E-06	268.08373	2.68084E-06	0.000718689	2688.84338	2.68884E-05	0.072298787
Cabierto	36.65730	3.66573E-29	1.34376E-27	374.44175	3.74442E-28	1.40207E-25	3762.98800	3.76299E-27	1.41601E-23

Tabla 49: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable con amplificación mecánica amplificado 10 100 y 1000 veces.

Como se ha comprobado hasta ahora el valor de la pendiente de la curva de regulación es igual al valor de la resistencia donde se produce la mayor transferencia de potencia. El valor de la pendiente para los tres casos es:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 40 \text{ M}\Omega) - V(R_L = 20 \text{ M}\Omega)}{I(R_L = 20 \text{ M}\Omega) - I(R_L = 40 \text{ M}\Omega)}$$

Amplificado x10:

$$m = 27,9 \text{ M}\Omega$$

Amplificado x100:

$$m = 28,3 \text{ M}\Omega$$

Amplificado x1000:

$$m = 27,8 \text{ M}\Omega$$

A continuación se muestran las curvas de regulación de cada caso:

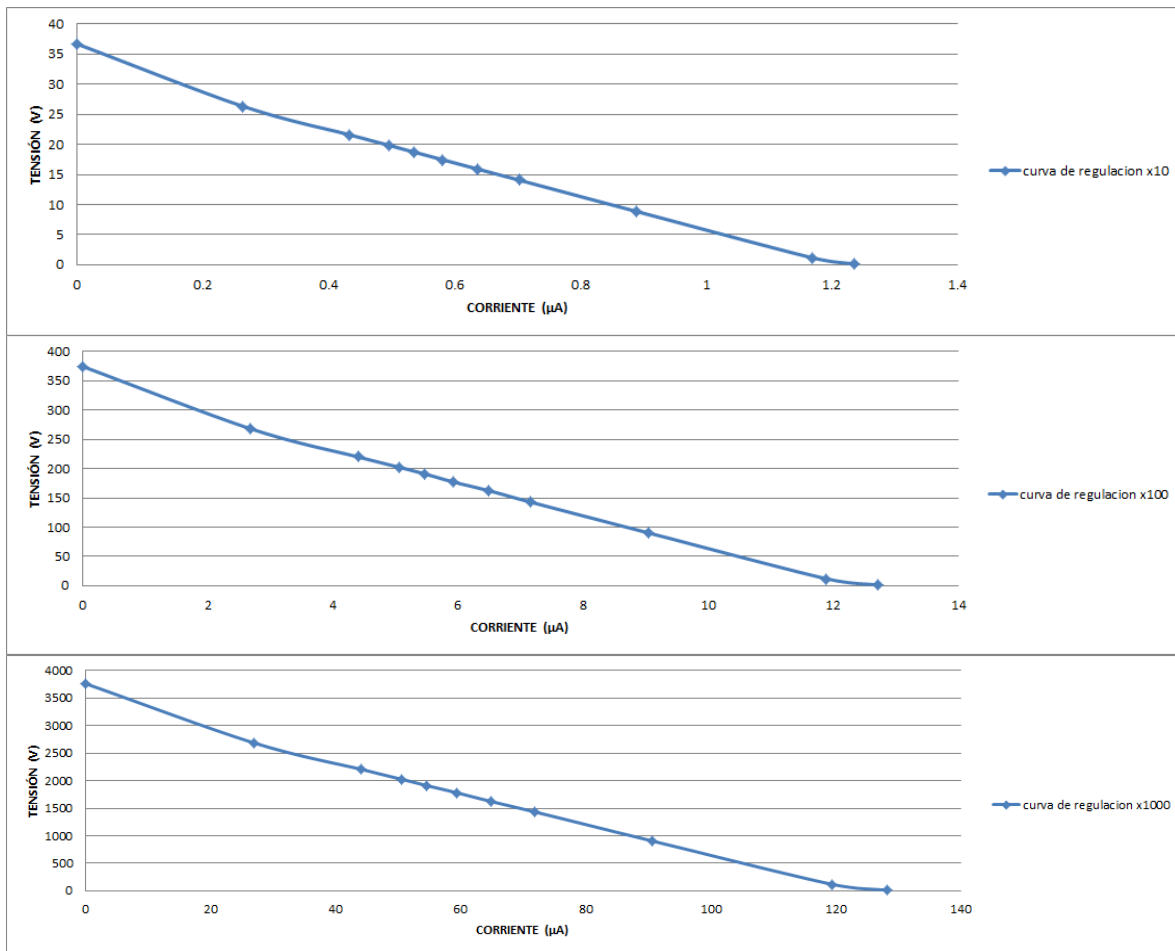


Figura 112: Curvas de regulación cable piezoeléctrico con amplificación mecánica amplificado 10, 100 y 1000 veces.

La potencia máxima que se obtiene en los tres casos es la siguiente:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O}$$

Amplificado x10:

$$P_{max} = 12 \mu W$$

Amplificado x100:

$$P_{max} = 1,2 mW$$

Amplificado x1000:

$$P_{max} = 127,3 mW$$

Las curvas de potencia en los tres casos son las siguientes:

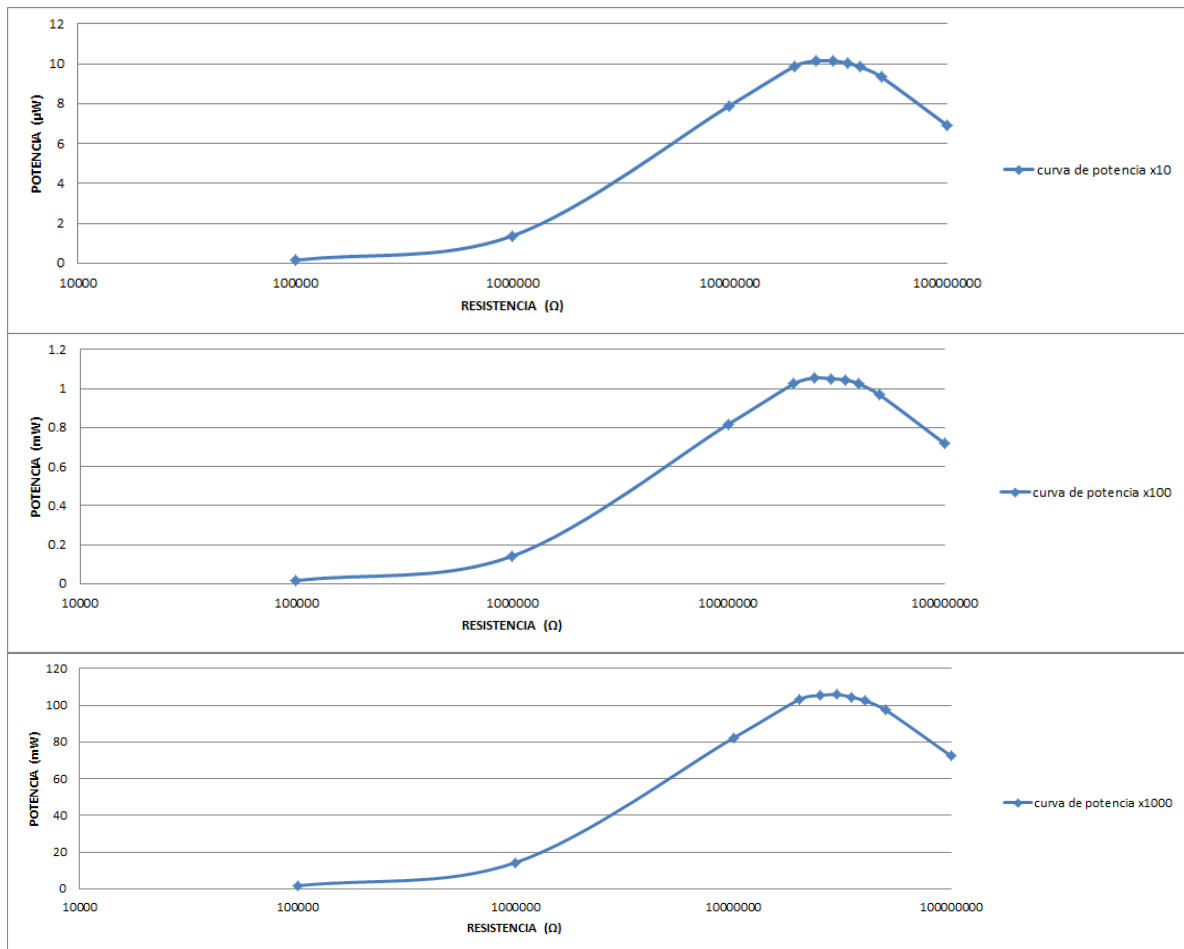


Figura 113: Curvas de potencia cable piezoeléctrico con amplificación mecánica amplificado 10, 100 y 1000 veces.

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos para el cable piezoeléctrico sin amplificación mecánica en los tres casos que se han amplificado 10, 100 y 1000.

RL	Vmax (x10)	IL (x10)	Pmax (x10)	Vmax (x100)	IL (x100)	Pmax (x100)	Vmax (x1000)	IL (x1000)	Pmax (x1000)
100kΩ	0.02986	2.98579E-07	8.91491E-09	0.33083	3.30831E-06	1.09449E-06	3.39981	3.39981E-05	0.000115587
1MΩ	0.28502	2.85018E-07	8.12353E-08	3.01636	3.01636E-06	9.09842E-06	30.47076	3.04708E-05	0.000928467
10MΩ	2.20442	2.20442E-07	4.85945E-07	23.31632	2.33163E-06	5.43651E-05	235.34877	2.35349E-05	0.005538904
20MΩ	3.53136	1.76568E-07	6.23525E-07	37.38550	1.86928E-06	6.98838E-05	377.28498	1.88642E-05	0.007117198
25MΩ	4.01414	1.60566E-07	6.44534E-07	42.51200	1.70048E-06	7.22908E-05	429.61580	1.71846E-05	0.007382789
30MΩ	4.41779	1.4726E-07	6.50563E-07	46.79984	1.55999E-06	7.30075E-05	472.19119	1.57397E-05	0.007432151
35MΩ	4.75884	1.35967E-07	6.47044E-07	50.41900	1.44054E-06	7.26307E-05	509.60333	1.45601E-05	0.007419873
40MΩ	5.05230	1.26307E-07	6.38142E-07	53.52700	1.33818E-06	7.16285E-05	541.09809	1.35275E-05	0.007319679
50MΩ	5.52920	1.10584E-07	6.11442E-07	58.60126	1.17203E-06	6.86821E-05	591.95565	1.18391E-05	0.00700823
100MΩ	6.81398	6.81398E-08	4.64303E-07	72.26900	7.2269E-07	5.22281E-05	730.25632	7.30256E-06	0.005332743
C.abierto	9.07800	9.078E-30	8.24101E-29	99.03000	9.903E-29	9.80694E-27	1008.23200	1.00823E-27	1.01653E-24

Tabla 50: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable sin amplificación mecánica amplificado 10 100 y 1000 veces.

El valor de la pendiente para los tres casos es:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 35 \text{ M}\Omega) - V(R_L = 20 \text{ M}\Omega)}{I(R_L = 20 \text{ M}\Omega) - I(R_L = 35 \text{ M}\Omega)}$$

Amplificado x10:

$$m = 30,23 \text{ M}\Omega$$

Amplificado x100:

$$m = 30,4 \text{ M}\Omega$$

Amplificado x1000:

$$m = 30,74 \text{ M}\Omega$$

A continuación se muestran las tres curvas de regulación:

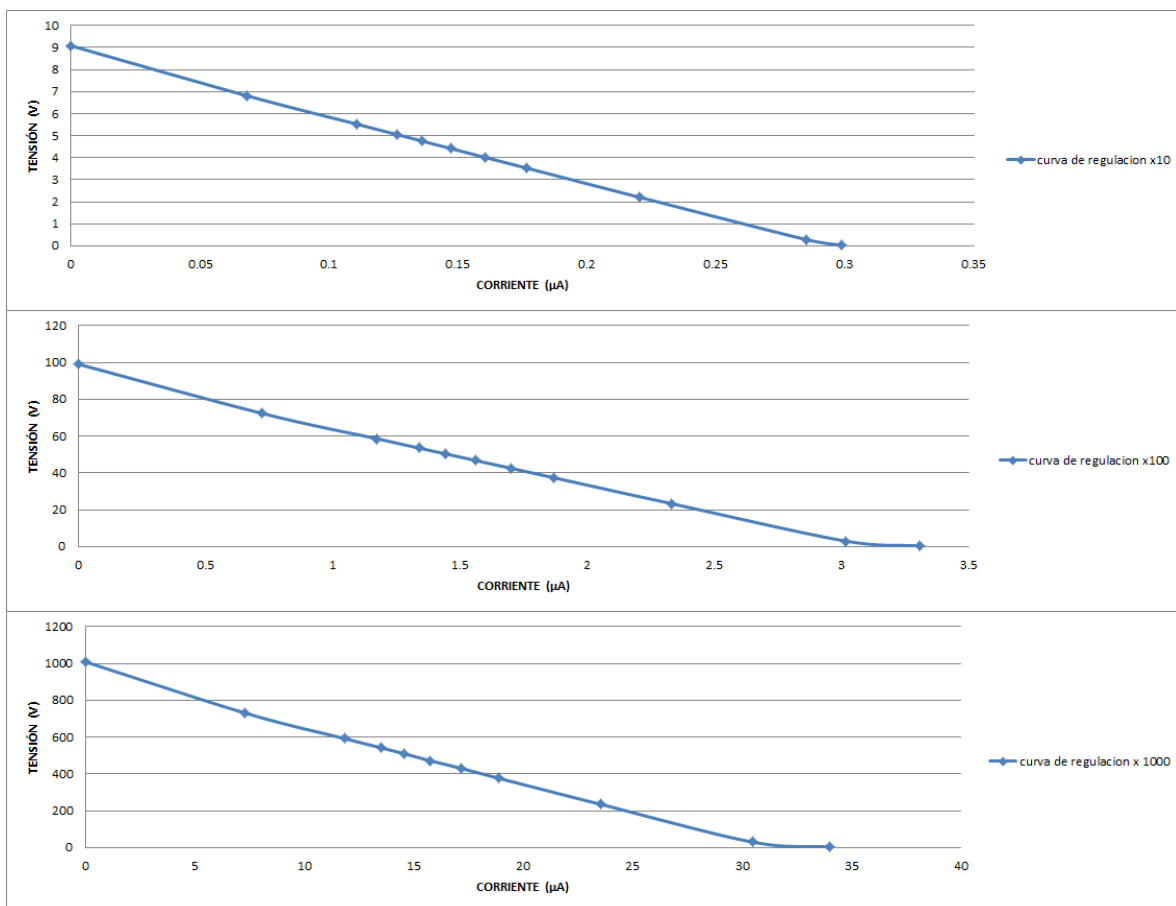


Figura 114: Curvas de regulación cable piezoeléctrico sin amplificación mecánica amplificado 10, 100 y 1000 veces.

La potencia máxima que se obtiene puede obtener en los tres casos es la siguiente:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{oc}^2}{4 \cdot R_0}$$

Amplificado x10:

$$P_{max} = 681,5 \text{ nW}$$

Amplificado x100:

$$P_{max} = 80,6 \mu\text{W}$$

Amplificado x1000:

$$P_{max} = 8,26 \text{ mW}$$

Las curvas de potencia en los tres casos son:

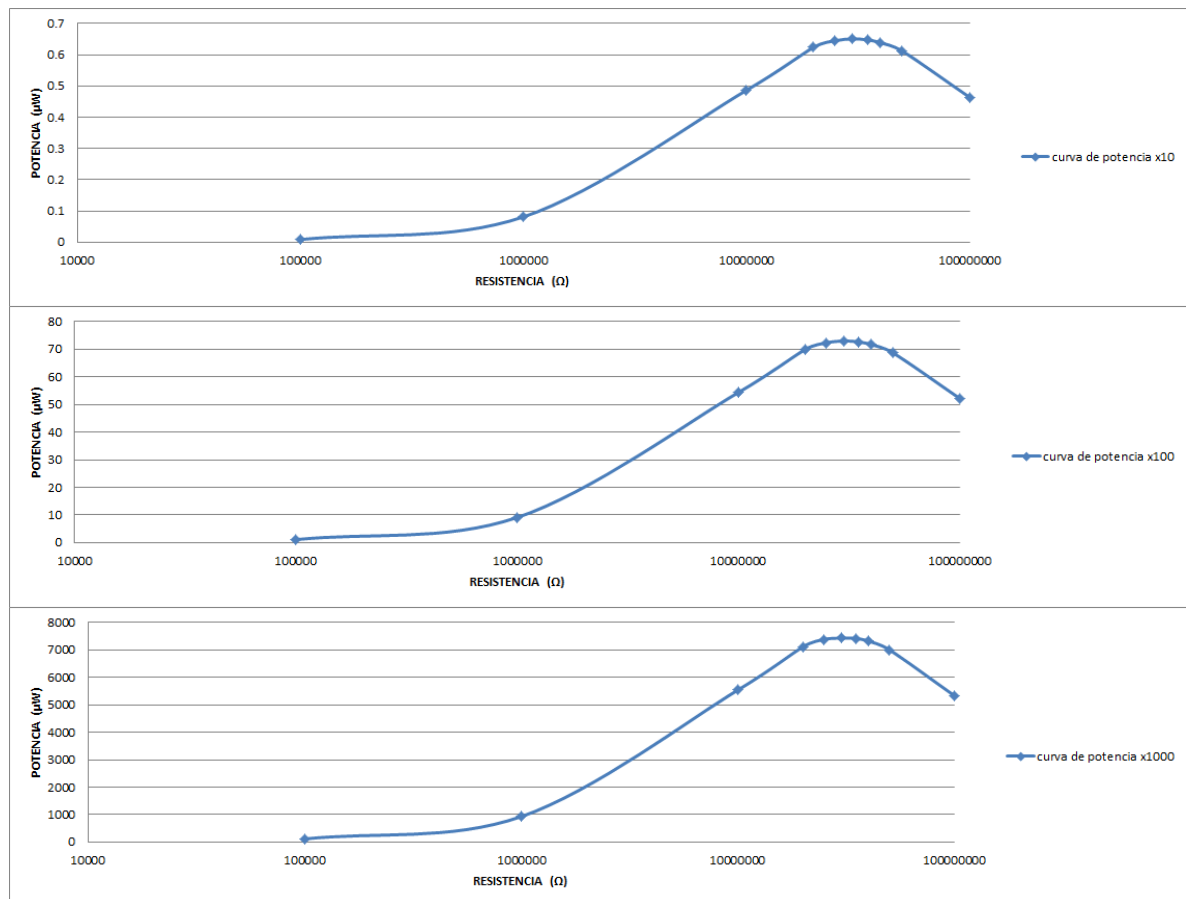


Figura 115: Curvas de potencia cable piezoeléctrico con amplificación mecánica amplificado 10, 100 y 1000 veces.

Siguiendo el orden que se ha seguido durante este proyecto el proximo modelo que se ha estudiado el efecto de la amplificación de 10, 100 y 1000 veces es el modelo del cable piezoeléctrico externo al aire, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

RL	Vmax (x10)	IL (x10)	Pmax (x10)	Vmax (x100)	IL (x100)	Pmax (x100)	Vmax (x1000)	IL (x1000)	Pmax (x1000)
100kΩ	0.98131	9.8131E-06	9.62968E-06	10.07965	0.000100796	0.001015992	102.36200	0.00102362	0.10477979
1MΩ	7.65050	7.6505E-06	5.85301E-05	76.59675	7.65968E-05	0.005867062	768.92050	0.000768921	0.591238735
10MΩ	58.97571	5.89757E-06	0.000347813	592.32124	5.92321E-05	0.035084445	5867.63200	0.000586763	3.442910529
20MΩ	94.26323	4.71316E-06	0.000444278	946.43743	4.73219E-05	0.044787191	9311.08200	0.000465554	4.334812401
25MΩ	107.09127	4.28365E-06	0.000458742	1075.06085	4.30024E-05	0.046230233	10521.69850	0.000420868	4.428245573
30MΩ	117.65087	3.9217E-06	0.000461391	1182.43168	3.94144E-05	0.046604822	11589.74300	0.000386325	4.47740476
35MΩ	126.84889	3.62425E-06	0.000459733	1274.31182	3.64089E-05	0.046396303	12442.71385	0.000355506	4.423460799
40MΩ	134.36354	3.35909E-06	0.000451339	1352.56622	3.38142E-05	0.045735885	13156.53550	0.000328913	4.327360659
50MΩ	146.97383	2.93948E-06	0.000432026	1477.08347	2.95417E-05	0.043635512	14340.26905	0.000286805	4.112866329
100MΩ	181.30146	1.81301E-06	0.000328702	1823.14377	1.82314E-05	0.033238532	17529.64940	0.000175296	3.072886081
C.abierto	267.75300	2.67753E-28	7.16917E-26	2697.60000	2.6976E-27	7.27705E-24	25951.22655	2.59512E-26	6.73466E-22

Tabla 51: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable exterior al aire amplificado 10 100 y 1000 veces.

El valor de la pendiente para los tres casos es:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 40 \text{ M}\Omega) - V(R_L = 20 \text{ M}\Omega)}{I(R_L = 20 \text{ M}\Omega) - I(R_L = 40 \text{ M}\Omega)}$$

Amplificado x10:

$$m = 29,6 \text{ M}\Omega$$

Amplificado x100:

$$m = 30,06 \text{ M}\Omega$$

Amplificado x1000:

$$m = 28,14 \text{ M}\Omega$$

A continuación se muestran las tres curvas de regulación:

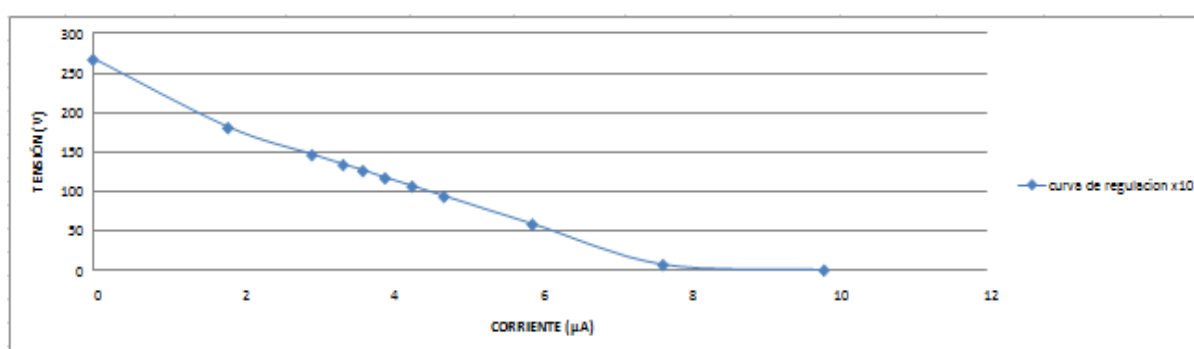


Figura 116: Curva de regulación cable piezoeléctrico en exterior al aire amplificado 10 veces.

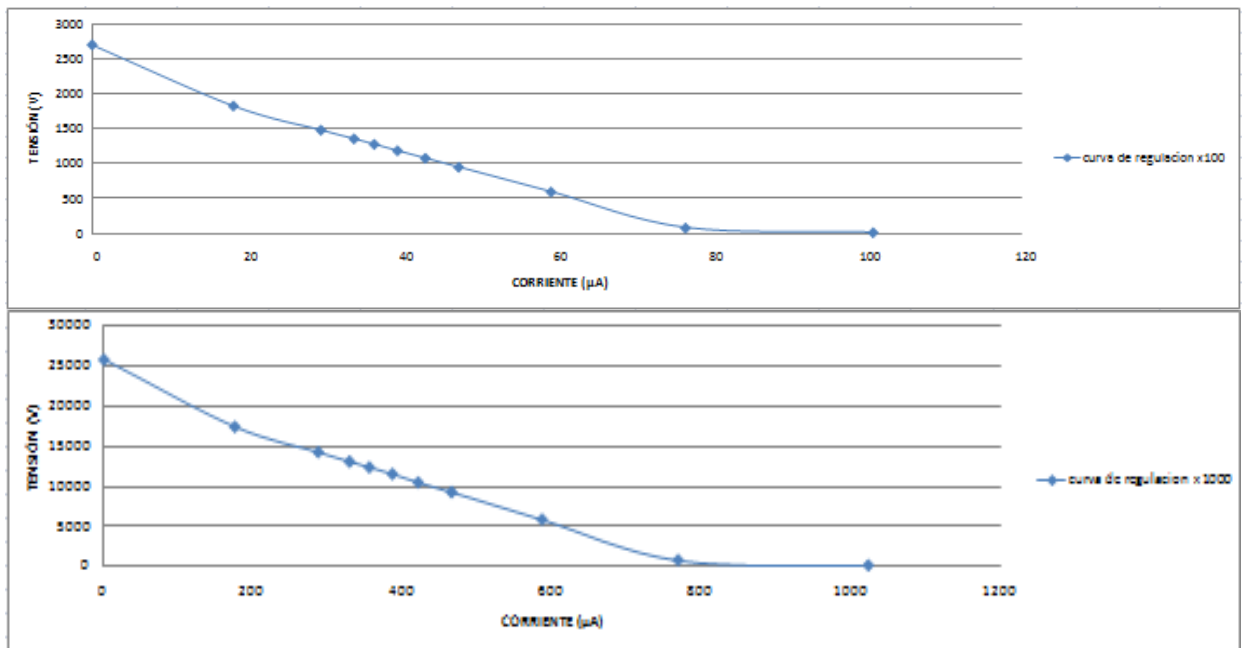


Figura 117: Curvas de regulación cable piezoeléctrico en exterior al aire amplificado 100 y 1000 veces.

La potencia máxima que se obtienen en los tres casos es:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{oc}^2}{4 \cdot R_o}$$

Amplificado x10:

$$P_{max} = 605,5 \mu W$$

Amplificado x100:

$$P_{max} = 59,4 mW$$

Amplificado x1000:

$$P_{max} = 5,98 W$$

Las curvas de potencia en los tres casos son:

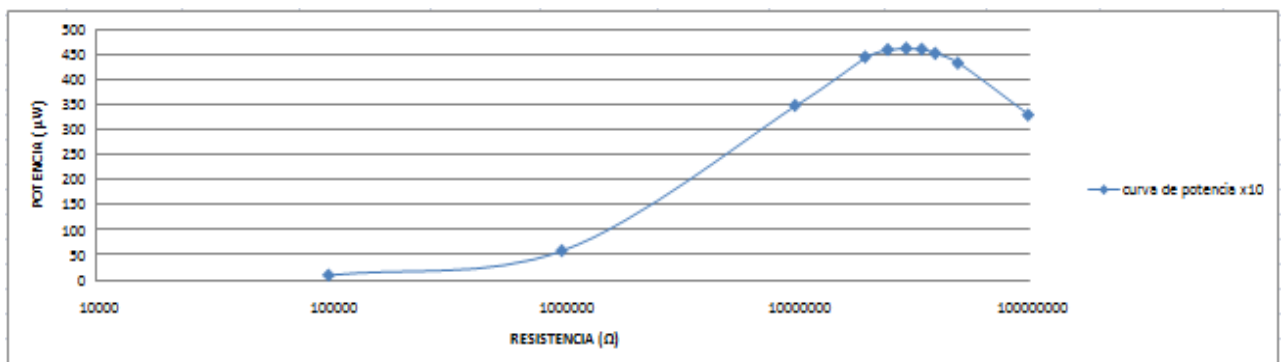


Figura 118: Curva de potencia cable piezoeléctrico en exterior al aire amplificado 10 veces.

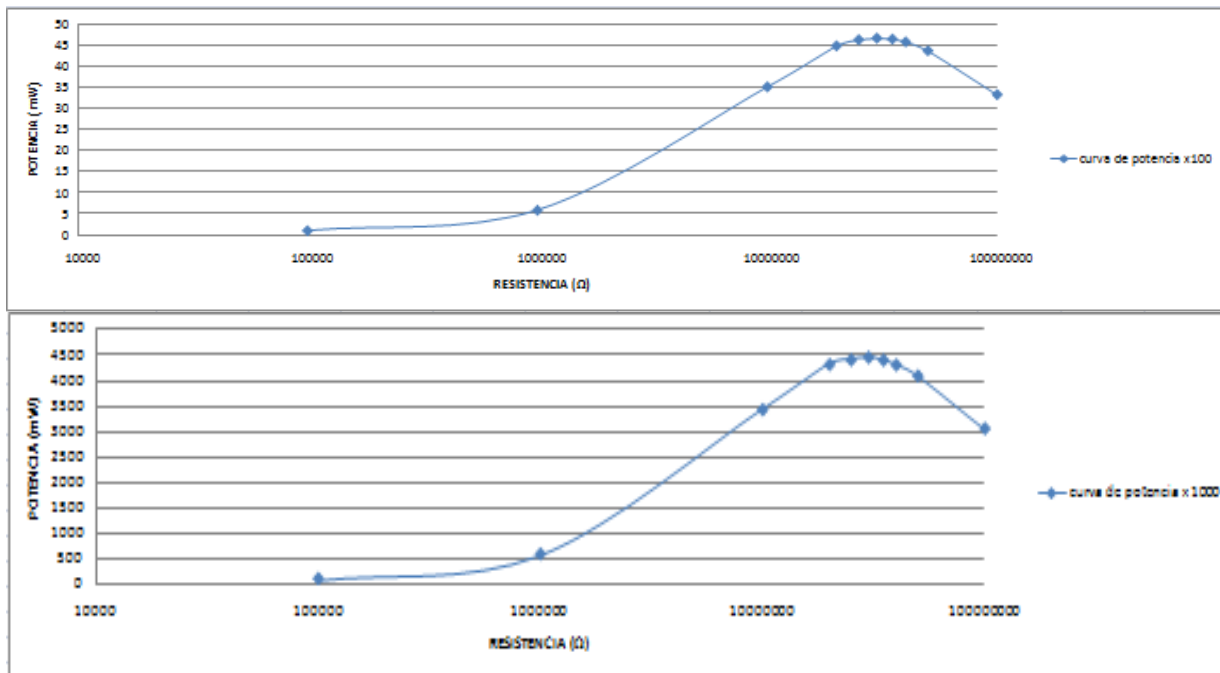


Figura 119: Curvas de potencia cable piezoeléctrico en exterior al aire amplificado 100 y 1000 veces.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos amplificando el modelo exterior enterrado 10, 100 y 1000 veces.

RL	Vmax (x10)	IL (x10)	Pmax (x10)	Vmax (x100)	IL (x100)	Pmax (x100)	Vmax (x1000)	IL (x1000)	Pmax (x1000)
100kΩ	0.08000	8.00015E-07	6.40024E-08	0.82211	8.22107E-06	6.75859E-06	8.27969	8.27969E-05	0.000685532
1MΩ	0.77248	7.72476E-07	5.96719E-07	7.89538	7.89538E-06	6.2337E-05	79.28261	7.92826E-05	0.006285732
10MΩ	5.45803	5.45803E-07	2.97901E-06	55.90647	5.59065E-06	0.000312553	561.86840	5.61868E-05	0.03156961
15MΩ	7.04079	4.69386E-07	3.30485E-06	72.14448	4.80963E-06	0.000346988	727.15957	4.84773E-05	0.035250736
20MΩ	8.23101	4.1155E-07	3.38747E-06	84.36674	4.21834E-06	0.000355887	847.46196	4.23731E-05	0.035909588
25MΩ	9.16729	3.66692E-07	3.36157E-06	93.98386	3.75935E-06	0.000353319	944.53794	3.77815E-05	0.035686077
30MΩ	9.90775	3.30258E-07	3.27212E-06	101.60577	3.38686E-06	0.000344124	1021.09291	3.40364E-05	0.034754358
35MΩ	10.53206	3.00916E-07	3.16926E-06	107.98466	3.08528E-06	0.000333163	1085.39807	3.10114E-05	0.033659685
50MΩ	11.84505	2.36901E-07	2.8061E-06	121.63134	2.43263E-06	0.000295884	1222.51144	2.44502E-05	0.029890684
100MΩ	13.88936	1.38894E-07	1.92914E-06	142.67163	1.42672E-06	0.000203552	1432.57402	1.43257E-05	0.020522683
C.abierto	19.03200	1.9032E-29	3.62217E-28	195.81300	1.95813E-28	3.83427E-26	1973.41000	1.97341E-27	3.89435E-24

Tabla 52: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable exterior enterrado amplificado 10, 100 y 1000 veces.

El valor de la pendiente para los tres casos es:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 30 \text{ M}\Omega) - V(R_L = 10 \text{ M}\Omega)}{I(R_L = 10 \text{ M}\Omega) - I(R_L = 30 \text{ M}\Omega)}$$

Amplificado x10:

$$m = 20,64 \text{ M}\Omega$$

Amplificado x100:

$$m = 20,73 \text{ M}\Omega$$

Amplificado x1000:

$$m = 20,35 \text{ M}\Omega$$

A continuación se muestran las curvas de regulación:

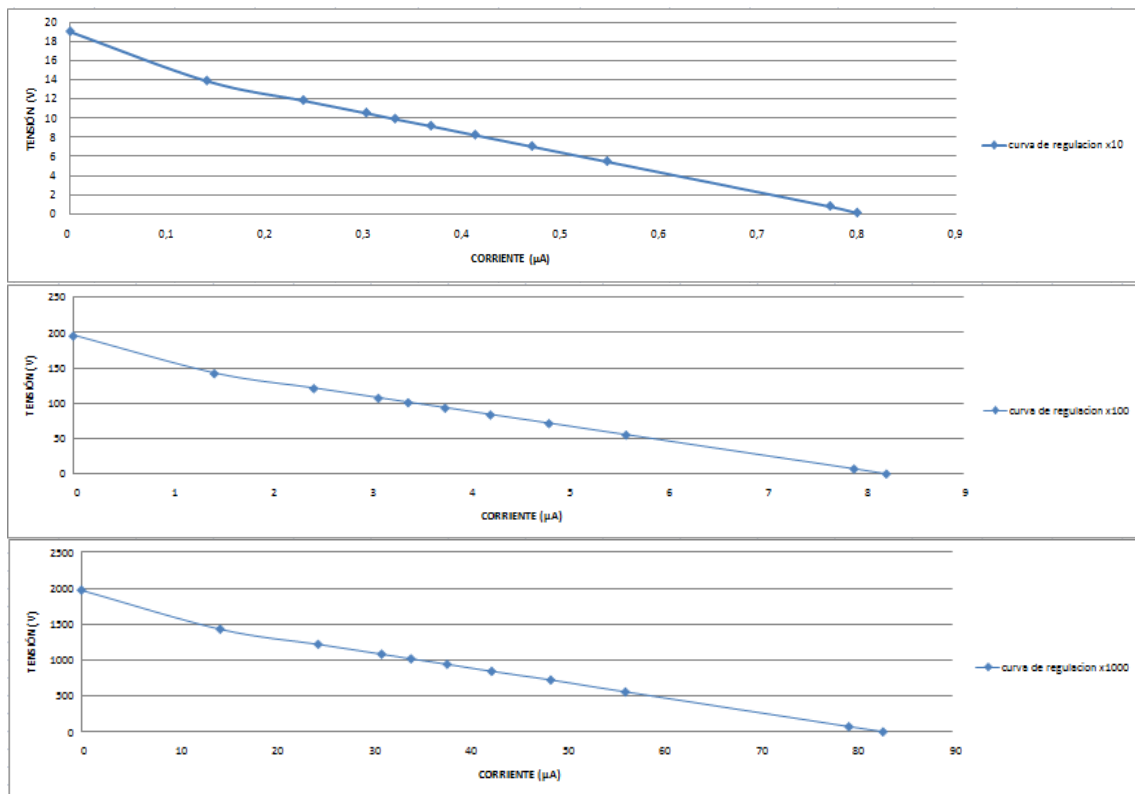


Figura 120: curvas de regulación cable piezoeléctrico en exterior al aire amplificado 10, 100 y 1000 veces.

La potencia máxima que se obtienen en los tres casos es:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_O}$$

Amplificado x10:

$$P_{max} = 4,38 \mu W$$

Amplificado x100:

$$P_{max} = 462,4 \mu W$$

Amplificado x1000:

$$P_{max} = 47,8 mW$$

Las curvas de potencia en los tres casos son:

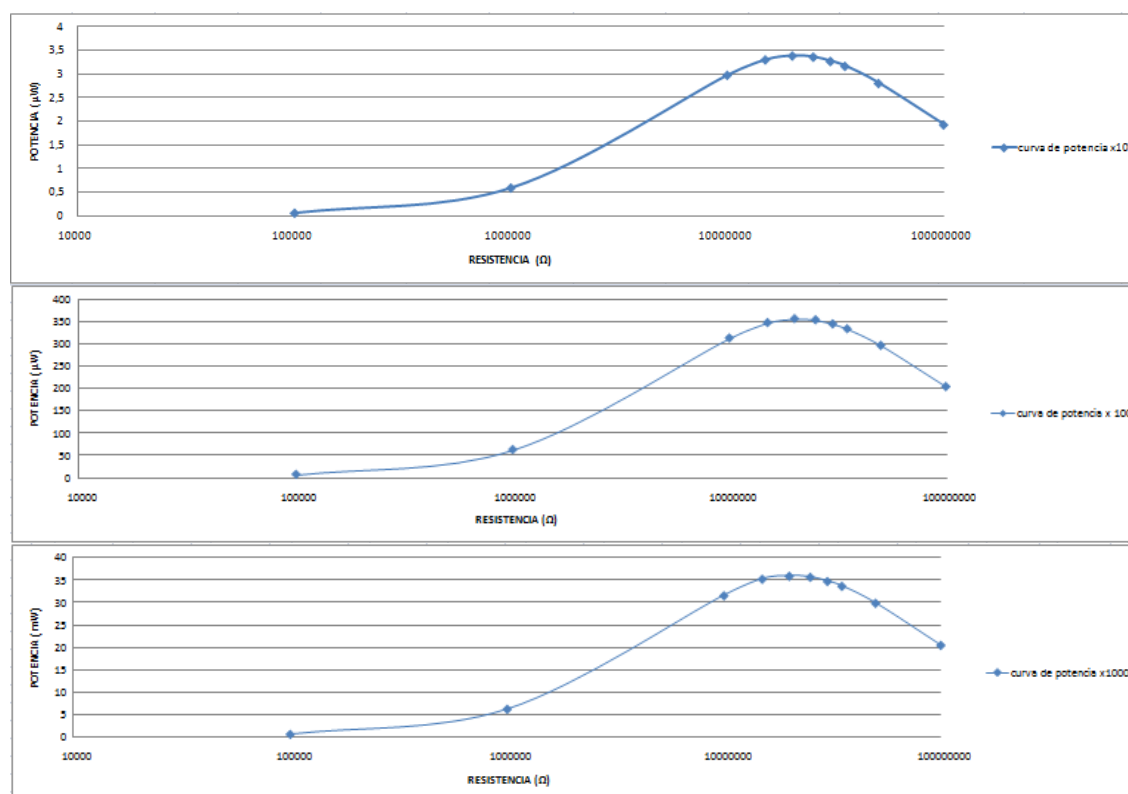


Figura 121: curvas de potencia cable piezoeléctrico en exterior enterrado amplificado 10, 100 y 1000 veces.

Por ultimo se ha realizado el estudio con el modelo del material piezoeléctrico que contiene un encendedor comercial. Para este modelo solo se ha podido realizar el estudio de la amplificación x10 porque la tensión obtenida en los demás casos es demasiado grande. Para realizar la medida amplificada por 10 al igual que la del modelo exterior al aire en la señal amplificada por 1000 se necesita modificar la opción RELTOL en los ajustes de simulación. Originalmente el valor de esta opción es de 0.001 y para poder realizar la simulación ponemos el valor 0.01, esto provoca que la precisión de la simulación sea algo menor sin tener un efecto importante sobre el resultado. Para los casos de la señal del mechero amplificada por 100 y por 1000 se debían modificar mas parámetros, pero al modificar los parámetros necesarios para que el programa Pspice pudiera simularlo el efecto que tenia sobre el resultado era muy importante dando lugar a resultados que no tenían nada que ver con la realidad.

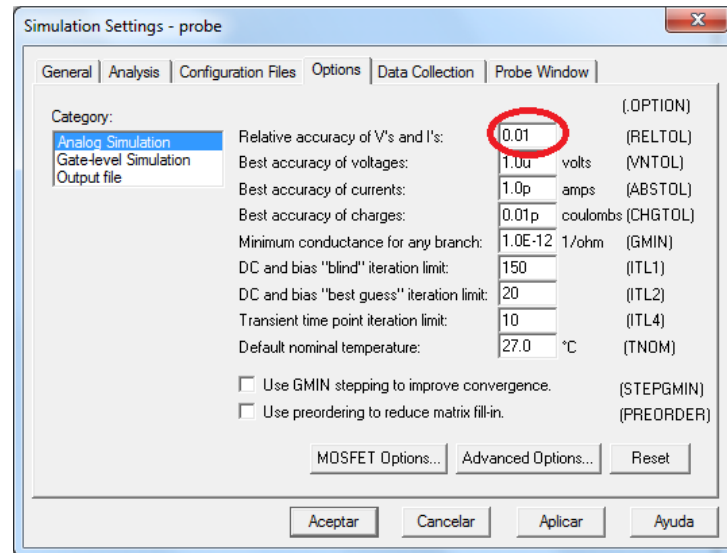


Figura 122: Opciones de simulación.

Una vez modificados los ajustes de simulación los resultados obtenidos para el modelo de un encendedor comercial amplificado por 10 se muestran en la siguiente tabla:

RL	Vmax	IL	PL
900kΩ	14.706	1.6340E-05	2.4030E-04
100MΩ	1293	1.2930E-05	1.6718E-02
1GΩ	8451	8.4510E-06	7.1419E-02
2GΩ	12398	6.1990E-06	7.6855E-02
5GΩ	17437	3.4874E-06	6.0810E-02
7GΩ	19072	2.7246E-06	5.1963E-02
10GΩ	20353	2.0353E-06	4.1424E-02
C.abierto	24851	2.4851E-05	6.1757E-01

Tabla 53: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un encendedor comercial amplificado por 10.

El valor de la pendiente de la curva de regulación es:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(R_L = 10 \text{ G}\Omega) - V(R_L = 100 \text{ M}\Omega)}{I(R_L = 100 \text{ M}\Omega) - I(R_L = 10 \text{ G}\Omega)} = \frac{203534 - 1293}{(12,93 - 2,0353) \cdot 10^{-6}} = 1,749 \text{ G}\Omega$$

La curva de regulación es la siguiente:

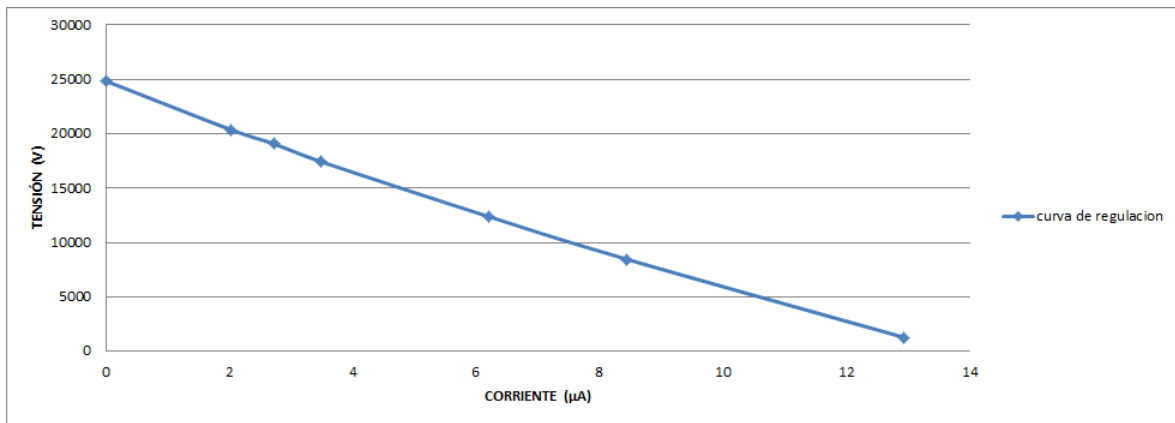


Figura 123: curva de regulación del encendedor comercial amplificado por 10.

La máxima potencia que se obtiene con este modelo es:

$$P_{M\acute{a}x} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_o} = \frac{24851^2}{4 \cdot 1,749 \cdot 10^7} = 0,088 \text{ mW}$$

La curva de potencia se muestra a continuación:

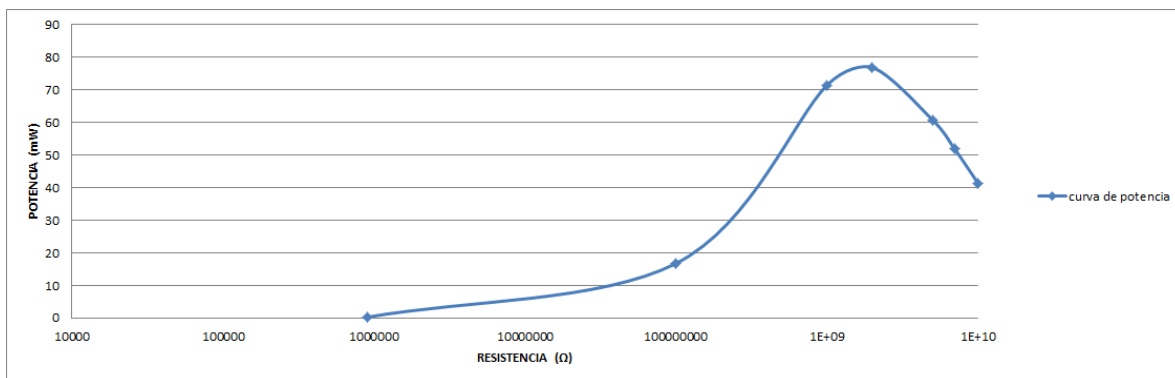


Figura 124: curva de potencia del encendedor comercial amplificado por 10.

3.4.2 Comparación de resultados.

Una vez obtenidos todos los resultados de todos o modelos estudiados se comparan con los obtenidos con los modelos sin amplificar para poder sacar conclusiones. Para sacar las conclusiones hay que tener en cuenta que todos los modelos parten con un error. También hay que tener en cuenta que las señales con la que se han obtenido los modelos son una modificación de las obtenidas.

A continuación se muestran cinco tablas donde se puede ver el efecto que tienen los modelos amplificados con respecto al modelo original.

asociacion	Voc	R0	Pmax	comparacion en veces con un cable		
				Voc	R0	Pmax
1 cable	3.047 V	27.7 MΩ	83 nW			
1 cable amplificado x10	36.657 V	27.9 MΩ	12 μW	12.03	0.99	144.58
1 cable amplificado x100	374.441 V	28.3 MΩ	1.2 mW	122.89	0.98	14457.83
1 cable amplificado x 1000	3762.988 V	27.8 MΩ	127.3 mW	1234.98	1.00	1533734.94

Tabla 54: comparación resultados del modelo de cable con amplificación mecánica.

asociacion	Voc	R0	Pmax	comparacion en veces con un cable		
				Voc	R0	Pmax
1 cable	0.5627 V	25.1 MΩ	3.15 nW			
1 cable amplificado x10	9.078 V	30.23 MΩ	681 nW	16.13	0.83	216.19
1 cable amplificado x100	99.03 V	30.4 MΩ	80.6 μW	175.99	0.83	25587.30
1 cable amplificado x 1000	1008.232 V	30.74 MΩ	8.26 mW	1791.78	0.82	2622222.22

Tabla 55: comparación resultados del modelo de cable sin amplificación mecánica.

asociacion	Voc	R0	Pmax	comparacion en veces con un cable		
				Voc	R0	Pmax
1 cable	25.584 V	29.84 MΩ	5.4 μW			
1 cable amplificado x10	267.753 V	29.6 MΩ	605.5 μW	10.47	1.01	112.13
1 cable amplificado x100	2697.6 V	30.06 MΩ	59.4 mW	105.44	0.99	11000.00
1 cable amplificado x 1000	25951.226 V	28.14 MΩ	5.98 W	1014.35	1.06	1107407.41

Tabla 56: comparación resultados del modelo de cable en el exterior al aire.

asociacion	Voc	R0	Pmax	comparacion en veces con un cable		
				Voc	R0	Pmax
1 cable	1.4724	20.55 MΩ	26.37 nW			
1 cable amplificado x10	19.032 V	20.64 MΩ	4.38 μW	12.93	1.00	166.10
1 cable amplificado x100	195.813 V	20.73 MΩ	462.4 μW	132.99	0.99	17535.08
1 cable amplificado x 1000	1973.41 V	20.35 MΩ	47.8 mW	1340.27	1.01	1812665.91

Tabla 57: comparación resultados del modelo de cable en el exterior enterrado.

asociacion	Voc	R0	Pmax	comparacion en veces con un cable		
				Voc	R0	Pmax
1 encendedor	2395.03 V	1.714 GΩ	836 μW			
1 encendedor amplificado x10	24851 V	1.749 GΩ	88 mW	10.38	0.98	105.26

Tabla 58: comparación resultados del modelo de un encendedor comercial.

A la vista de la comparación de resultados se pueden sacar varias conclusiones, la primera de ellas y la que más clara se ve es que aunque la señal se amplifique la resistencia donde se produce mayor transferencia de potencia no varía su valor. La segunda conclusión no esta tan clara debido al error que poseen los modelos pero se puede intuir, según se observa en los resultados la tensión máxima que se obtiene es la original multiplicada por el valor en que se ha amplificado la señal.

A partir de estas dos conclusiones extraídas se puede asegurar que si se consigue amplificar la señal obtenida de un material piezoeléctrico se conseguirá una potencia bastante mayor. El valor de esta potencia será la multiplicación de la potencia original que se obtiene por el cuadrado del valor que se a amplificado. Para entender esto mejor ahora vemos un ejemplo: si un material piezoeléctrico proporciona una potencia de $10\mu\text{W}$ y se consigue amplificar su señal por 4 la potencia que se obtendría seria de $160\mu\text{W}$.

3.5 Estudio del efecto de la distancia de seguridad en aplicaciones viales de los materiales piezoeléctricos.

3.5.1 Curvas de regulación y potencia con distancia de seguridad.

El último estudio realizado es el efecto que tiene la distancia de seguridad sobre la potencia que se obtiene. Este estudio se a realizado sobre las 4 velocidades de limitación más comunes, 50km/h, 70km/h, 90km/h y 120km/h. este estudio es una aproximación y las conclusiones que se obtienen de él puede que no se asemejen a la realidad completamente. Esto es debido a que las señales con que se han trabajado han sido creadas por nosotros a partir de las originales ante la imposibilidad de obtenerlas. Las señales se han conseguido modificando únicamente el periodo de la señal para que cumpla la distancia de seguridad adecuada y el tiempo que transcurre entre el paso de los dos ejes para que la señal cumpla la velocidad estipulada. Ha pesar de que la señal creada cumple la distancia de seguridad y simula una señal de cada una de las velocidades no podemos saber el pico máximo de tensión y el ancho de cada pulso que provoca cada paso del eje. En la señal se ha dejado el máximo del que se partía pero este máximo depende de la velocidad, cuanto mayor sea la velocidad mayor será el máximo, y también depende si el vehículo en el momento de pasar por el material piezoeléctrico esta acelerando o no, en caso de que este acelerando el máximo es mayor. Además del pico máximo hay que tener en cuenta que el ancho del pulso al pasar por el material piezoeléctrico es menor cuanto mayor sea la velocidad. Como estas dos circunstancias no se han podido medir las señales creadas serán parecidas a las señales que obtendríamos realmente. En las siguientes figuras se muestran la señal original del cable piezoeléctrico amplificado y la señal modificada simulando una distancia de seguridad de 50 km/h.

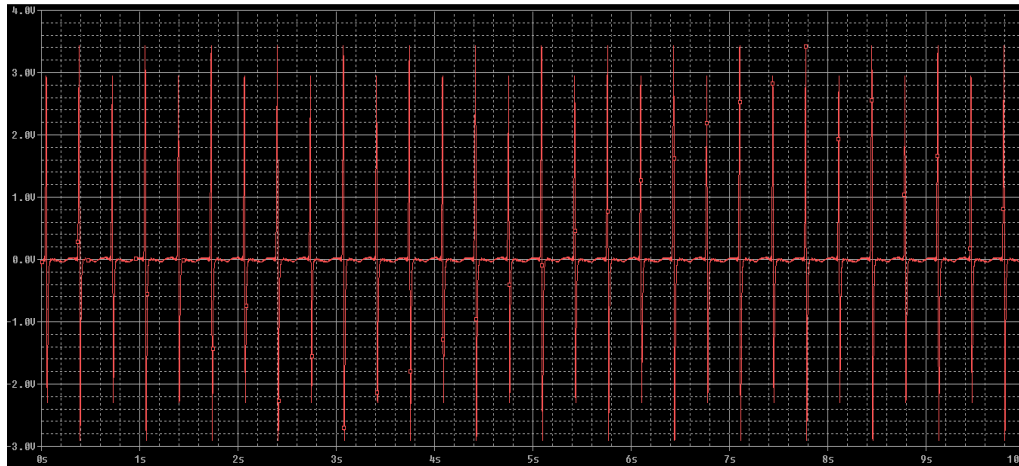


Figura 125: Señal original cable amplificado mecánicamente

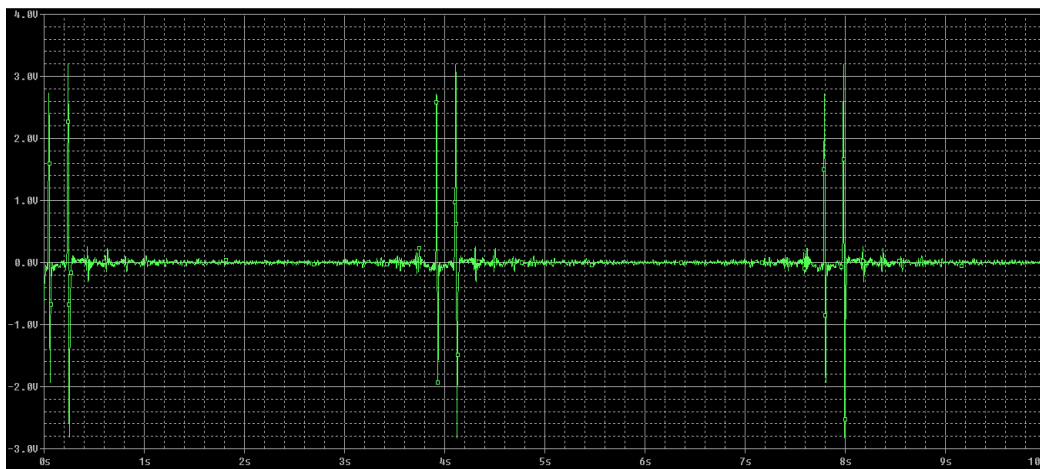


Figura 126: Señal modificada para 50km/h

Para realizar este estudio se ha seguido el mismo proceso que los anteriores, primero se obtienen los valores para la creación de las curvas de regulación y potencia para las 4 velocidades que se ha estudiado y para los 5 modelos que se han venido estudiando hasta ahora. Después se obtienen el valor R_o y de la potencia máxima. El orden que se ha seguido es el mismo que hasta ahora, a continuación se muestran los valores obtenidos para el modelo con amplificación mecánica en los 4 casos.

RL	Vmax (50km)	IL (50km)	Pmax (50km)	RL	Vmax (70km)	IL (70km)	Pmax (70km)
100kΩ	0.0020227	2.0227E-08	4.09132E-11	100kΩ	0.0016924	1.6924E-08	2.86422E-11
1MΩ	0.0179547	1.7955E-08	3.22371E-10	1MΩ	0.01472975	1.473E-08	2.16966E-10
10MΩ	0.11926115	1.1926E-08	1.42232E-09	10MΩ	0.09974775	9.9748E-09	9.94961E-10
70MΩ	0.4259048	6.0844E-09	2.59136E-09	50MΩ	0.2896615	5.7932E-09	1.67808E-09
80MΩ	0.458519	5.7315E-09	2.628E-09	60MΩ	0.3228179	5.3803E-09	1.73686E-09
90MΩ	0.4890185	5.4335E-09	2.6571E-09	70MΩ	0.35225315	5.0322E-09	1.7726E-09
100MΩ	0.5167831	5.1678E-09	2.67065E-09	80MΩ	0.3785786	4.7322E-09	1.79152E-09
110MΩ	0.54231695	4.9302E-09	2.67371E-09	90MΩ	0.4023727	4.4708E-09	1.79893E-09
120MΩ	0.56569625	4.7141E-09	2.66677E-09	100MΩ	0.422889	4.2289E-09	1.78835E-09
300MΩ	0.82554	2.7518E-09	2.27172E-09	300MΩ	0.65526	2.1842E-09	1.43122E-09
C.abierto	1.240127054	1.2401E-30	1.53792E-30	C.abierto	0.945	9.45E-31	8.93025E-31
RL	Vmax (90km)	IL (90km)	Pmax (90km)	RL	Vmax (120km)	IL (120km)	Pmax (120km)
100kΩ	0.001412	1.41E-08	1.99E-11	100kΩ	0.00109315	1.09315E-08	1.19498E-11
1MΩ	0.01199515	1.20E-08	1.44E-10	1MΩ	0.00847685	8.47685E-09	7.1857E-11
50MΩ	0.2151564	4.30E-09	9.26E-10	10MΩ	0.05353015	5.35302E-09	2.86548E-10
60MΩ	0.23637695	3.94E-09	9.31E-10	15MΩ	0.0685126	4.56751E-09	3.12932E-10
70MΩ	0.2570013	3.67E-09	9.44E-10	20MΩ	0.0803265	4.01633E-09	3.22617E-10
80MΩ	0.27532395	3.44E-09	9.48E-10	25MΩ	0.09004205	3.60168E-09	3.24303E-10
90MΩ	0.29124635	3.24E-09	9.42E-10	30MΩ	0.0982518	3.27506E-09	3.21781E-10
100MΩ	0.30584035	3.06E-09	9.35E-10	50MΩ	0.12257885	2.45158E-09	3.00511E-10
300MΩ	0.46868	1.56E-09	7.32E-10	100MΩ	0.1544219	1.54422E-09	2.38461E-10
C.abierto	0.704137	7.04E-31	4.96E-31	C.abierto	0.23537795	2.35378E-31	5.54028E-32

Tabla 59: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable con amplificación mecánica con distancia de seguridad.

El valor de la pendiente de la curva de regulación y por tanto el valor de R_o es:

Velocidad 50km/h:

$$m = 100.85 \text{ M}\Omega$$

Velocidad 70km/h:

$$m = 87.47 \text{ M}\Omega$$

Velocidad 90km/h:

$$m = 78.82 \text{ M}\Omega$$

Velocidad 120km/h:

$$m = 27 \text{ M}\Omega$$

A continuación se muestran las 4 curvas de regulación:

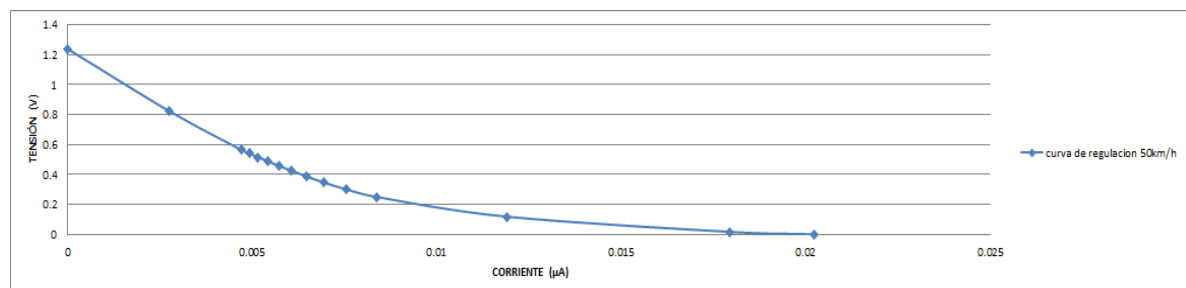


Figura 127: Curva de regulación cable piezoeléctrico con amplificación mecánica velocidad 50km/h.

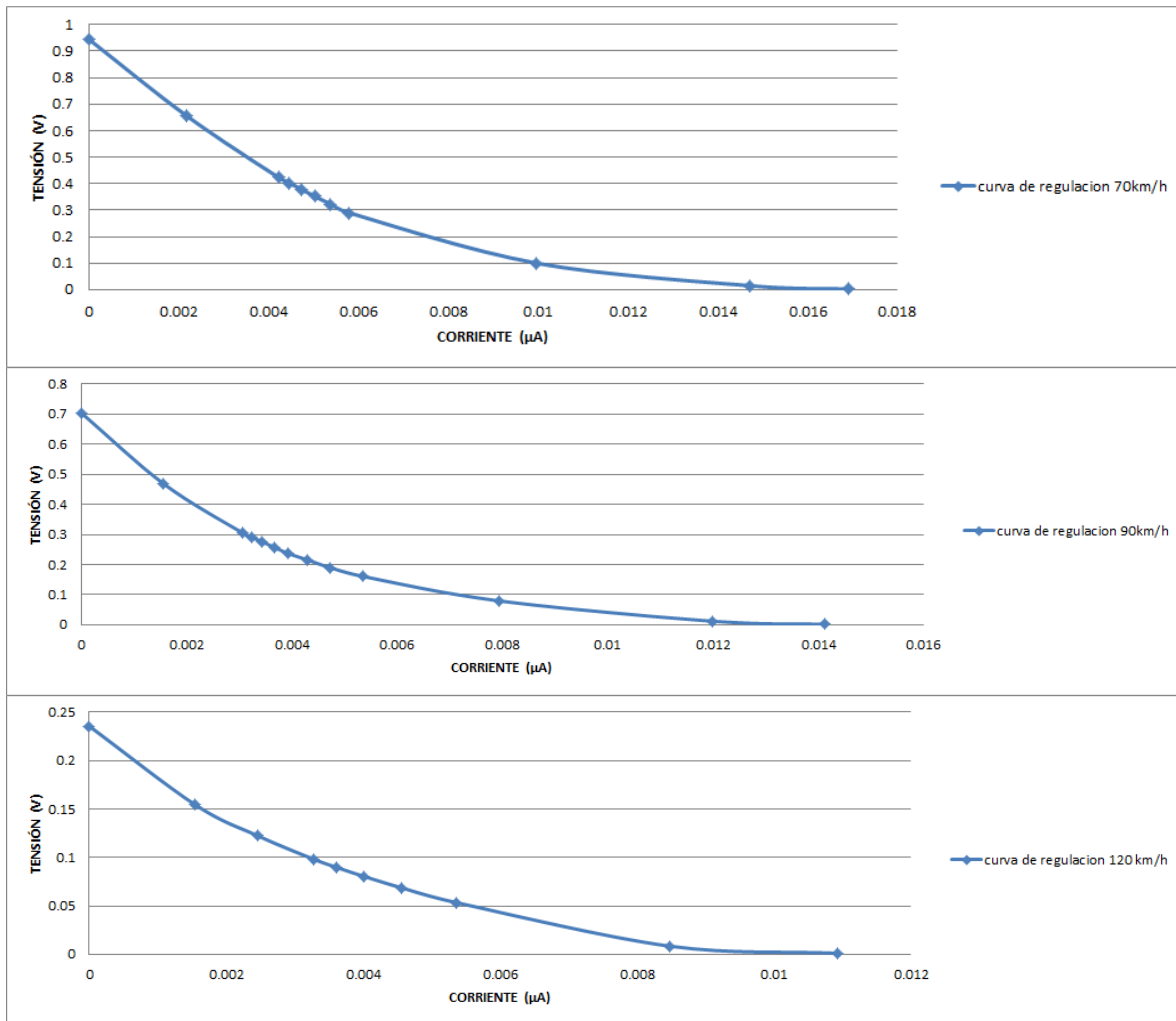


Figura 128: Curvas de regulación cable piezoeléctrico con amplificación mecánica velocidad 70km/h, 90km/h y 120km/h.

La potencia que se obtiene como máximo en los cuatro casos es:

Potencia máxima 50km/h:

$$P_{\max} = 3.81 \text{ nW}$$

Potencia máxima 70km/h:

$$P_{\max} = 2.55 \text{ nW}$$

Potencia máxima 90km/h:

$$P_{\max} = 1.57 \text{ nW}$$

Potencia máxima 120km/h:

$$P_{\max} = 0.51 \text{ nW}$$

A continuación se muestran las curvas de potencia de los cuatro casos:

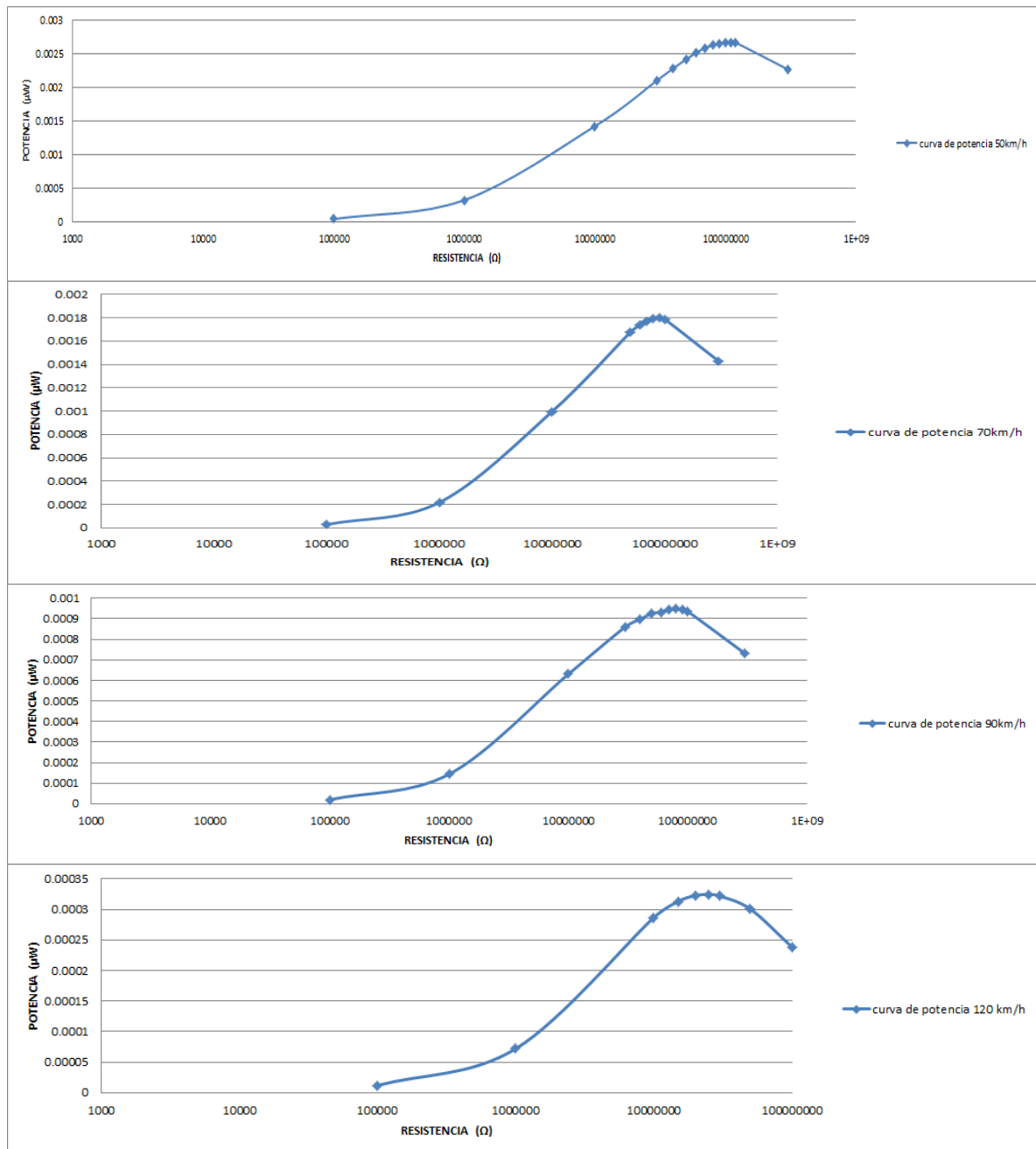


Figura 129: Curvas de potencia cable piezoeléctrico con amplificación mecánica velocidad 50 km/h, 70km/h, 90km/h y 120km/h.

Siguiendo el orden de los estudios anteriores en las siguientes tablas se muestran los datos obtenidos para el cable sin amplificación mecánica para los cuatro casos:

RL	Vmax (50km)	IL (50km)	Pmax (50km)	Vmax (70km)	IL (70km)	Pmax (70km)
100kΩ	0.000389884	3.89884E-09	1.5201E-12	0.000312447	3.1245E-09	9.76228E-13
1MΩ	0.003461787	3.46179E-09	1.1984E-11	0.00255369	2.5537E-09	6.52133E-12
5MΩ	0.013299848	2.65997E-09	3.53772E-11	0.009771637	1.9543E-09	1.9097E-11
10MΩ	0.020922323	2.09223E-09	4.37744E-11	0.015278237	1.5278E-09	2.33425E-11
15MΩ	0.026013229	1.73422E-09	4.51125E-11	0.018890355	1.2594E-09	2.37897E-11
20MΩ	0.029712553	1.48563E-09	4.41418E-11	0.021472034	1.0736E-09	2.30524E-11
25MΩ	0.032539523	1.30158E-09	4.23528E-11	0.023417498	9.367E-10	2.19352E-11
50MΩ	0.04049432	8.09886E-10	3.27958E-11	0.028747961	5.7496E-10	1.65289E-11
100MΩ	0.04643159	4.64316E-10	2.15589E-11	0.032574152	3.2574E-10	1.06108E-11
C.abierto	0.055023	5.5023E-32	3.02753E-33	0.037821989	3.7822E-32	1.4305E-33
RL	Vmax (90km)	IL (90km)	Pmax (90km)	Vmax (120km)	IL (120km)	Pmax (120km)
100kΩ	0.000247696	2.47696E-09	6.13533E-13	0.000202702	2.027E-09	4.10881E-13
1MΩ	0.002063846	2.06385E-09	4.25946E-12	0.001563618	1.5636E-09	2.4449E-12
5MΩ	0.007872424	1.57448E-09	1.2395E-11	0.005882005	1.1764E-09	6.9196E-12
10MΩ	0.0122612	1.22612E-09	1.50337E-11	0.009227593	9.2276E-10	8.51485E-12
15MΩ	0.015109685	1.00731E-09	1.52202E-11	0.011338208	7.5588E-10	8.57033E-12
20MΩ	0.017123994	8.562E-10	1.46616E-11	0.012816501	6.4083E-10	8.21313E-12
25MΩ	0.018633477	7.45339E-10	1.38883E-11	0.013912655	5.5651E-10	7.74248E-12
50MΩ	0.022695111	4.53902E-10	1.03014E-11	0.016826757	3.3654E-10	5.66279E-12
100MΩ	0.02555556	2.55556E-10	6.53087E-12	0.018842162	1.8842E-10	3.55027E-12
C.abierto	0.029365956	2.9366E-32	8.62359E-34	0.021451117	2.1451E-32	4.6015E-34

Tabla 60: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable sin amplificación mecánica con distancia de seguridad.

El valor de la pendiente de la curva de regulación y por tanto el valor de Ro es:

Velocidad 50km/h:

$$m = 14.69 \text{ M}\Omega$$

Velocidad 70km/h:

$$m = 13.77 \text{ M}\Omega$$

Velocidad 90km/h:

$$m = 13.25 \text{ M}\Omega$$

Velocidad 120km/h:

$$m = 12.79 \text{ M}\Omega$$

A continuación se muestran las 4 curvas de regulación:

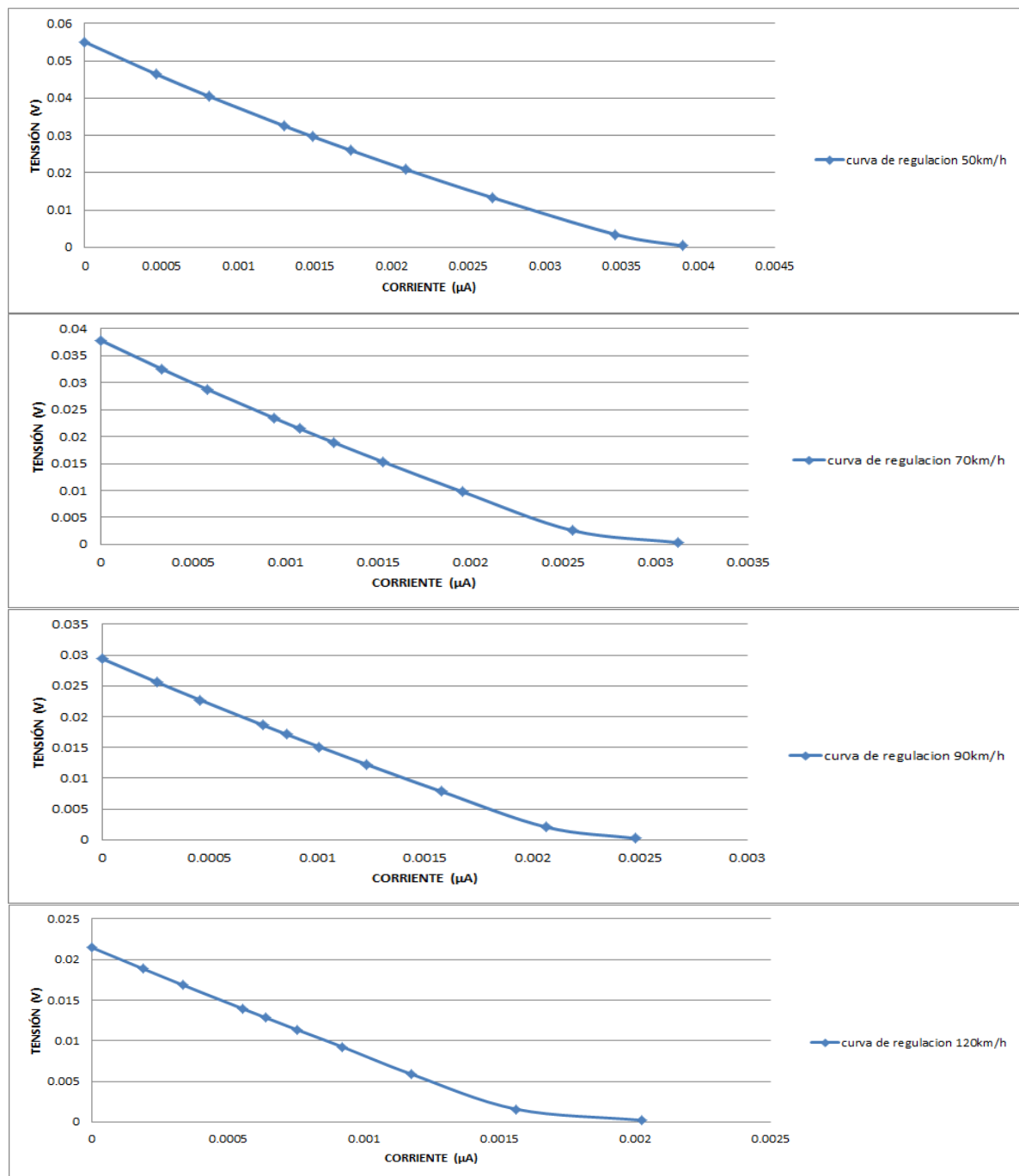


Figura 130: Curvas de regulación cable piezoeléctrico sin amplificación mecánica velocidad 50km/h 70km/h, 90km/h y 120km/h.

La potencia que se obtiene como máximo en los cuatro casos es:

Potencia máxima 50km/h:

$$P_{\max} = 51,48 \text{ pW}$$

Potencia máxima 70km/h:

$$P_{\max} = 24,85 \text{ pW}$$

Potencia máxima 90km/h:

$$P_{\max} = 16,19 \text{ pW}$$

Potencia máxima 120km/h:

$$P_{\max} = 8,99 \text{ pW}$$

A continuación se muestran las curvas de potencia de los cuatro casos:

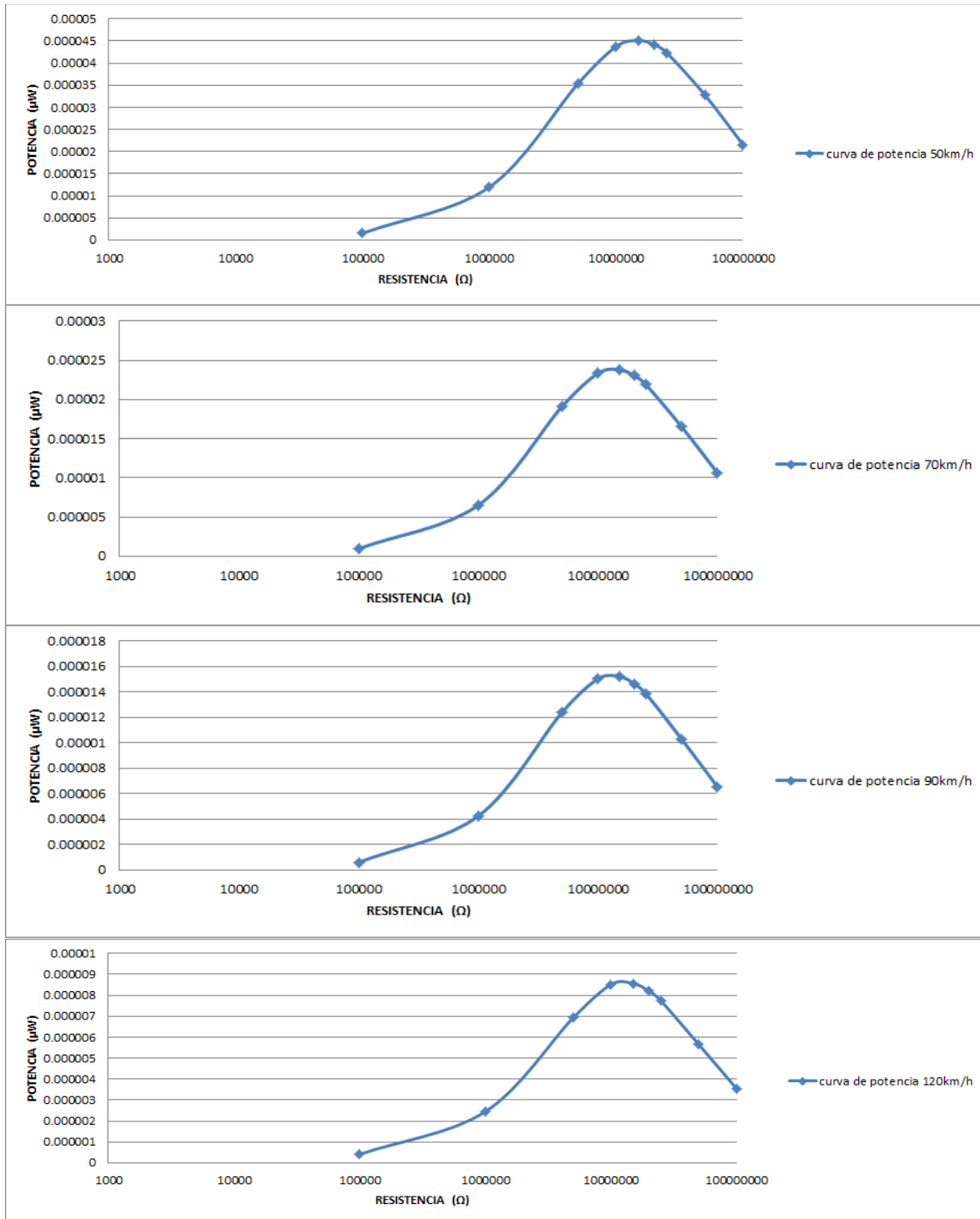


Figura 131: curvas de potencia cable piezoeléctrico sin amplificación mecánica velocidad 50 km/h, 70km/h, 90km/h y 120km/h.

En las siguientes tablas se muestran los datos obtenidos para el cable en el exterior al aire para los cuatro casos:

RL	Vmax (50km)	IL (50km)	Pmax (50km)	RL	Vmax (70km)	IL (70km)	Pmax (70km)
100kΩ	0.0395635	3.95635E-07	1.56527E-08	100kΩ	0.032003	3.2003E-07	1.02419E-08
1MΩ	0.3283745	3.28375E-07	1.0783E-07	1MΩ	0.2605775	2.6058E-07	6.79006E-08
10MΩ	2.454602	2.4546E-07	6.02507E-07	10MΩ	1.984686	1.9847E-07	3.93898E-07
50MΩ	8.306352	1.66127E-07	1.37991E-06	50MΩ	7.0906445	1.4181E-07	1.00554E-06
60MΩ	9.2450775	1.54085E-07	1.42452E-06	80MΩ	9.432054	1.179E-07	1.11205E-06
70MΩ	10.0562665	1.43661E-07	1.44469E-06	90MΩ	10.0530885	1.117E-07	1.12294E-06
80MΩ	10.765637	1.3457E-07	1.44874E-06	100MΩ	10.620638	1.0621E-07	1.12798E-06
90MΩ	11.3904785	1.26561E-07	1.44159E-06	110MΩ	11.1094565	1.01E-07	1.122E-06
100MΩ	11.9680145	1.1968E-07	1.43233E-06	120MΩ	11.5868045	9.6557E-08	1.11878E-06
300MΩ	17.08182	5.69394E-08	9.72629E-07	300MΩ	16.03963	5.3465E-08	8.57566E-07
C.abierto	22.7257154	2.27257E-29	5.16458E-28	C.abierto	22.143	2.2143E-29	4.90312E-28
RL	Vmax (90km)	IL (90km)	Pmax (90km)	RL	Vmax (120km)	IL (120km)	Pmax (120km)
100kΩ	0.0269935	2.69935E-07	7.28649E-09	100kΩ	0.021226	2.1226E-07	4.50543E-09
1MΩ	0.215281	2.15281E-07	4.63459E-08	1MΩ	0.161252	1.6125E-07	2.60022E-08
10MΩ	1.6496465	1.64965E-07	2.72133E-07	10MΩ	1.267024	1.267E-07	1.60535E-07
60MΩ	6.9117015	1.15195E-07	7.96194E-07	50MΩ	4.9128785	9.8258E-08	4.82728E-07
70MΩ	7.657152	1.09388E-07	8.376E-07	100MΩ	7.8881715	7.8882E-08	6.22232E-07
80MΩ	8.31064	1.03883E-07	8.63334E-07	110MΩ	8.3464625	7.5877E-08	6.33304E-07
90MΩ	8.898817	9.88757E-08	8.79877E-07	120MΩ	8.771899	7.3099E-08	6.41218E-07
100MΩ	9.409138	9.40914E-08	8.85319E-07	130MΩ	9.2134425	7.0873E-08	6.52981E-07
110MΩ	9.922125	9.02011E-08	8.94987E-07	140MΩ	9.5847715	6.8463E-08	6.56199E-07
120MΩ	10.372273	8.64356E-08	8.96534E-07	150MΩ	9.9855595	6.657E-08	6.64743E-07
130MΩ	10.7534445	8.27188E-08	8.89512E-07	160MΩ	10.267575	6.4172E-08	6.58894E-07
140MΩ	11.121474	7.94391E-08	8.8348E-07	170MΩ	10.5287495	6.1934E-08	6.52086E-07
300MΩ	14.8047	4.9349E-08	7.30597E-07	300MΩ	13.135	4.3783E-08	5.75094E-07
C.abierto	21.2022342	2.12022E-29	4.49535E-28	C.abierto	20.526	2.0526E-29	4.21317E-28

Tabla 61: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable en el exterior al aire con distancia de seguridad.

El valor de la pendiente de la curva de regulación y por tanto el valor de R_o es:

Velocidad 50km/h:

$$m = 79.14 \text{ M}\Omega$$

Velocidad 70km/h:

$$m = 99.22 \text{ M}\Omega$$

Velocidad 90km/h:

$$m = 114.78 \text{ M}\Omega$$

Velocidad 120km/h:

$$m = 147.14 \text{ M}\Omega$$

A continuación se muestran las 4 curvas de regulación:

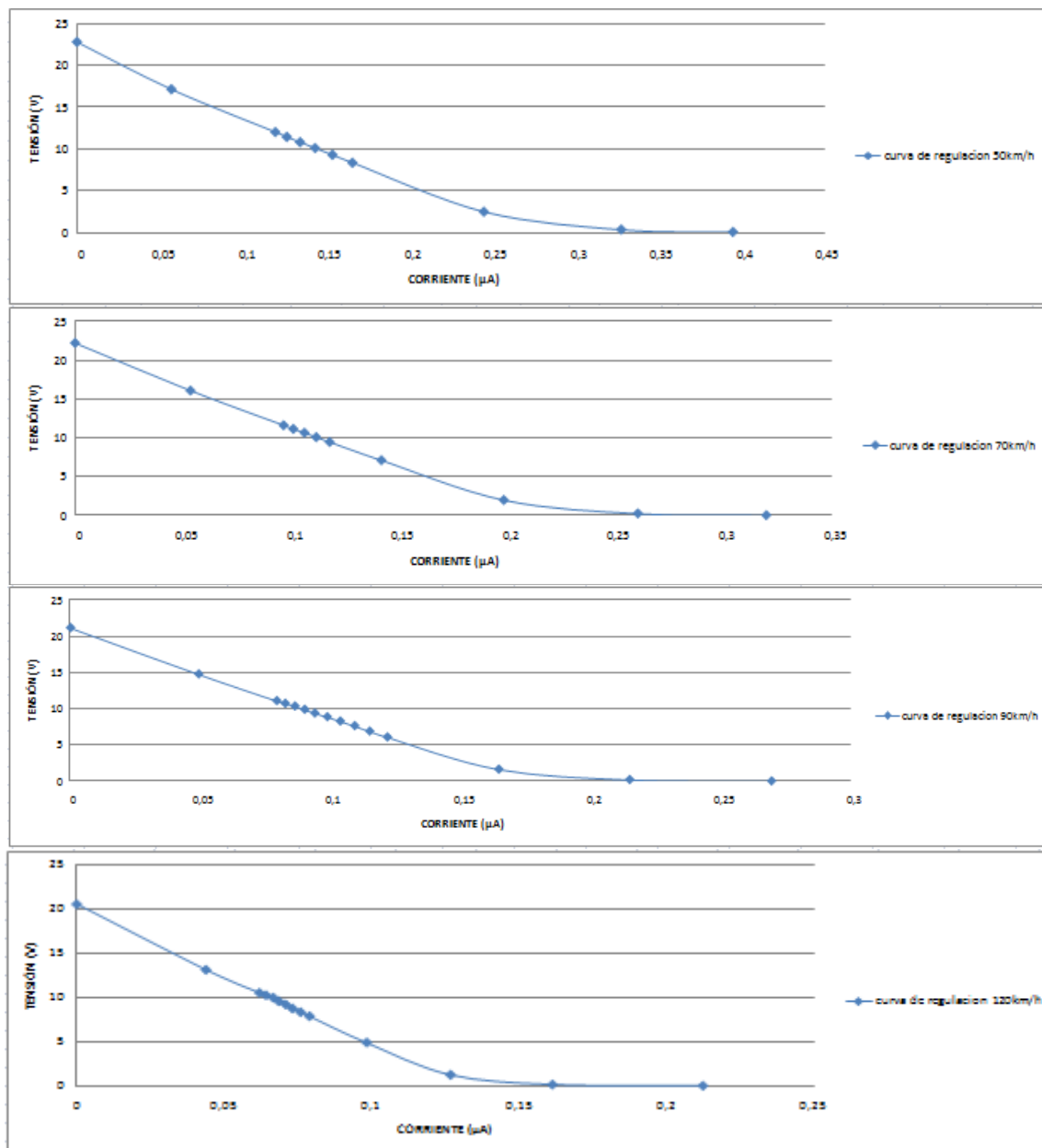


Figura 132: Curvas de regulación cable piezoeléctrico exterior al aire velocidad 50km/h 70km/h, 90km/h y 120km/h.

La potencia que se obtiene como máximo en los cuatro casos es:

Potencia máxima 50km/h:

$$P_{\max} = 1,63 \mu\text{W}$$

Potencia máxima 70km/h:

$$P_{\max} = 1,23 \mu\text{W}$$

Potencia máxima 90km/h:

$$P_{\max} = 0,979 \mu\text{W}$$

Potencia máxima 120km/h:

$$P_{\max} = 0,715 \mu\text{W}$$

A continuación se muestran las curvas de potencia de los cuatro casos:

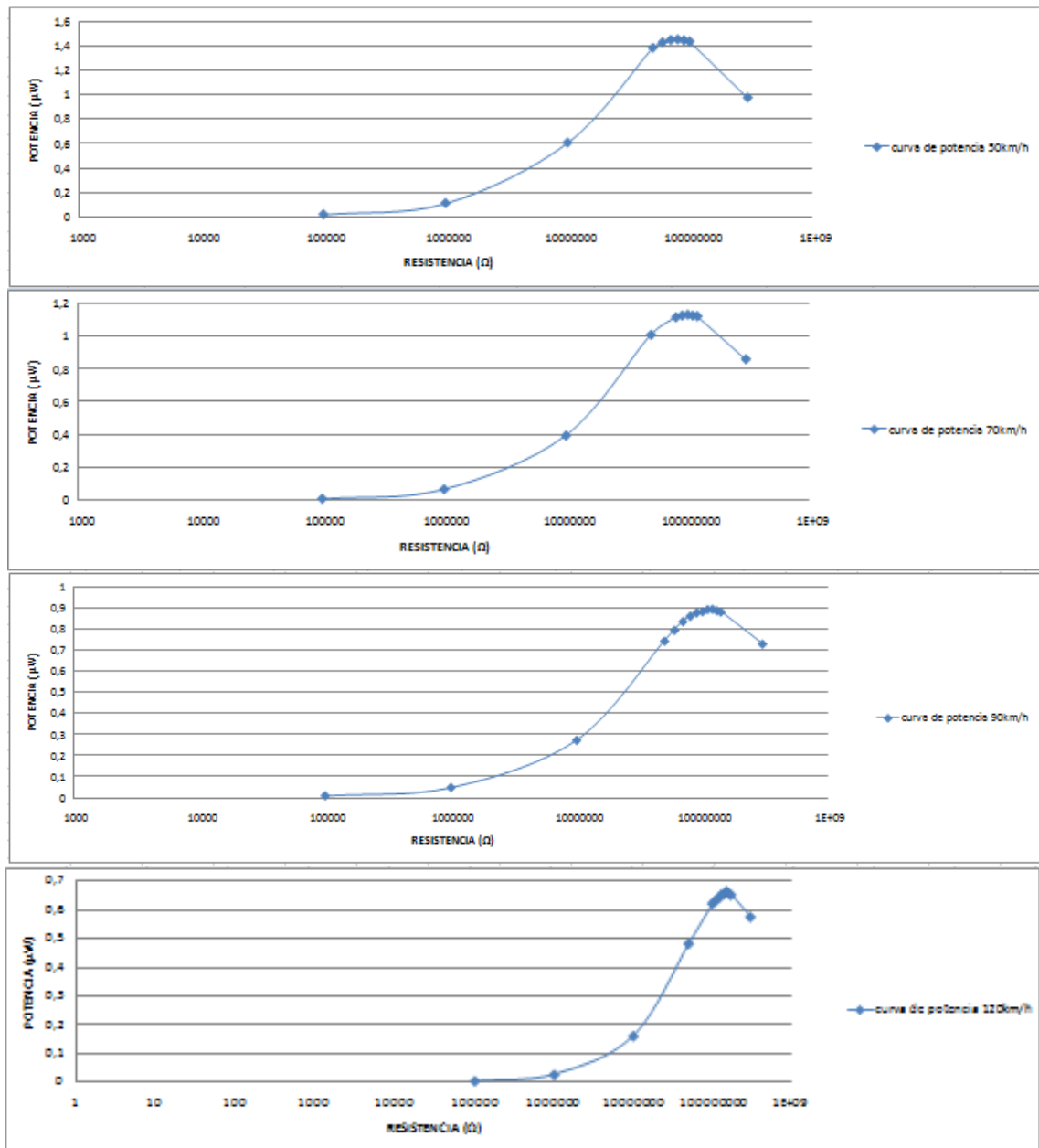


Figura 133: Curvas de potencia cable piezoeléctrico exterior al aire velocidad 50 km/h, 70km/h, 90km/h y 120km/h.

En las siguientes tablas se muestran los valores para el último caso de cable piezoeléctrico estudiado:

RL	Vmax (50km)	IL (50km)	Pmax (50km)	RL2	Vmax (70km)	IL (70km)	Pmax (70km)
100kΩ	0.00102095	1.02095E-08	1.04234E-11	100kΩ	0.000823373	8.23373E-09	6.77942E-12
1MΩ	0.009356467	9.35647E-09	8.75435E-11	1MΩ	0.007309622	7.30962E-09	5.34306E-11
60MΩ	0.184670916	3.07785E-09	5.68389E-10	10MΩ	0.047166369	4.71664E-09	2.22467E-10
70MΩ	0.200904853	2.87007E-09	5.76611E-10	20MΩ	0.071800125	3.59001E-09	2.57763E-10
80MΩ	0.215520077	2.694E-09	5.80611E-10	30MΩ	0.088160856	2.9387E-09	2.59078E-10
90MΩ	0.229187	2.54652E-09	5.8363E-10	40MΩ	0.1006349	2.51587E-09	2.53185E-10
100MΩ	0.241511422	2.41511E-09	5.83278E-10	50MΩ	0.11009984	2.202E-09	2.42439E-10
500MΩ	0.43203097	8.64062E-10	3.73302E-10	100MΩ	0.141360342	1.4136E-09	1.99827E-10
C.abierto	0.553	5.53E-31	3.05809E-31	C.abierto	0.234584922	2.34585E-31	5.50301E-32
RL	Vmax (90km)	IL (90km)	Pmax (90km)	Vmax (120km)	IL (120km)	Pmax (120km)	
100kΩ	0.000688738	6.88738E-09	4.7436E-12	0.000555732	5.55732E-09	3.08838E-12	
1MΩ	0.005914876	5.91488E-09	3.49858E-11	0.004401632	4.40163E-09	1.93744E-11	
10MΩ	0.037312262	3.73123E-09	1.3922E-10	0.027084704	2.70847E-09	7.33581E-11	
20MΩ	0.055074835	2.75374E-09	1.51662E-10	0.039117278	1.95586E-09	7.65081E-11	
30MΩ	0.066404178	2.21347E-09	1.46984E-10	0.046306068	1.54354E-09	7.14751E-11	
40MΩ	0.074485968	1.86215E-09	1.38704E-10	0.051183289	1.27958E-09	6.54932E-11	
50MΩ	0.080785389	1.61571E-09	1.30526E-10	0.054686321	1.09373E-09	5.98119E-11	
100MΩ	0.098220443	9.82204E-10	9.64726E-11	0.063956515	6.39565E-10	4.09044E-11	
C.abierto	0.132126206	1.32126E-31	1.74573E-32	0.078683782	7.86838E-32	6.19114E-33	

Tabla 62: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un cable en el exterior enterrado mecánica con distancia de seguridad.

El valor de la pendiente de la curva de regulación y por tanto el valor de Ro es:

Velocidad 50km/h:

$$m = 85.76 \text{ M}\Omega$$

Velocidad 70km/h:

$$m = 27.59 \text{ M}\Omega$$

Velocidad 90km/h:

$$m = 22.59 \text{ M}\Omega$$

Velocidad 120km/h:

$$m = 18,05 \text{ M}\Omega$$

A continuación se muestran las 4 curvas de regulación:

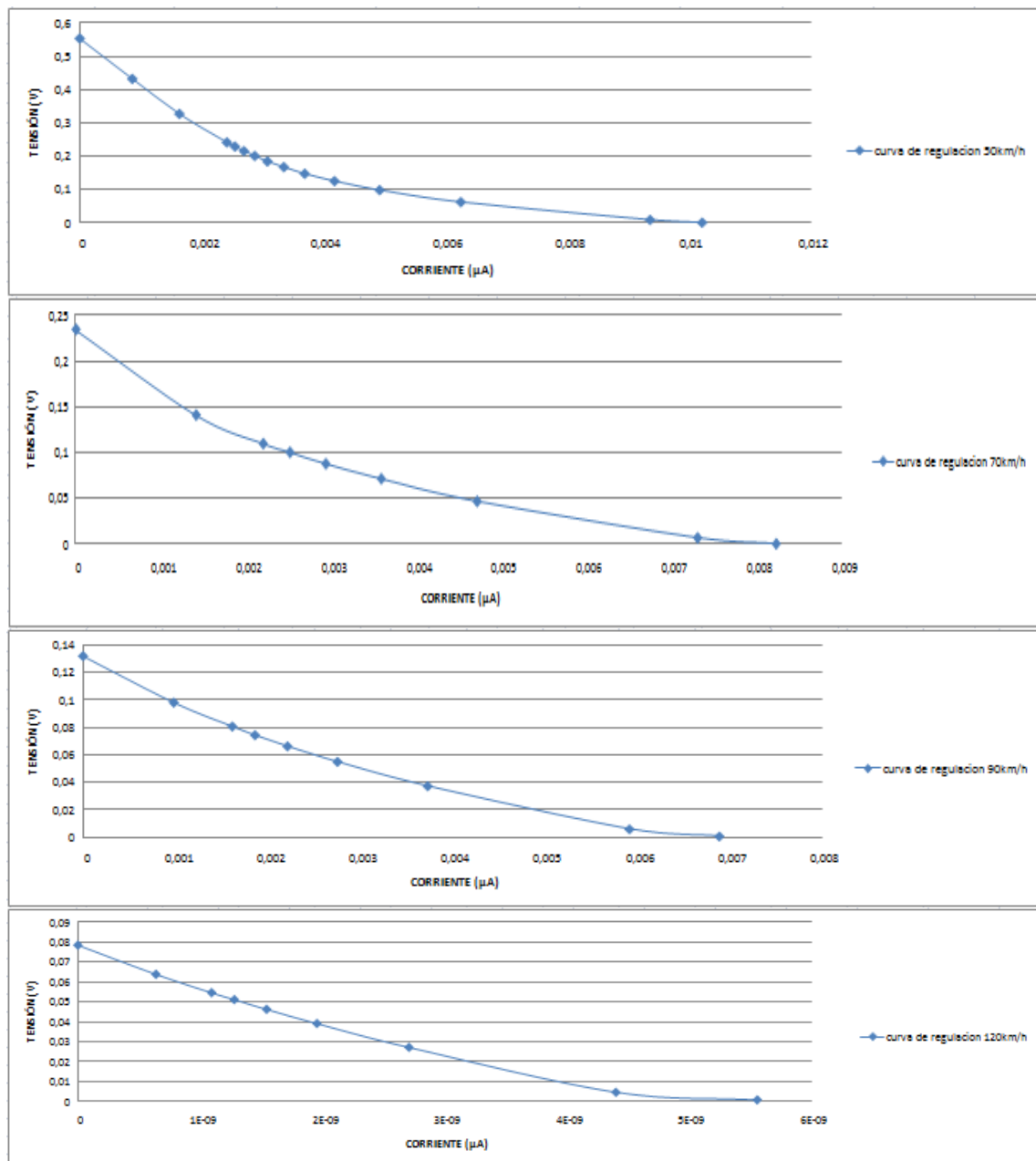


Figura 134: Curvas de regulación cable piezoeléctrico exterior enterrado velocidad 50km/h 70km/h, 90km/h y 120km/h.

La potencia que se obtiene como máximo en los cuatro casos es:

Potencia máxima 50km/h:

$$P_{\max} = 891 \text{ pW}$$

Potencia máxima 70km/h:

$$P_{\max} = 496 \text{ pW}$$

Potencia máxima 90km/h:

$$P_{\max} = 192 \text{ pW}$$

Potencia máxima 120km/h:

$$P_{\max} = 85 \text{ pW}$$

A continuación se muestran las curvas de potencia de los cuatro casos:

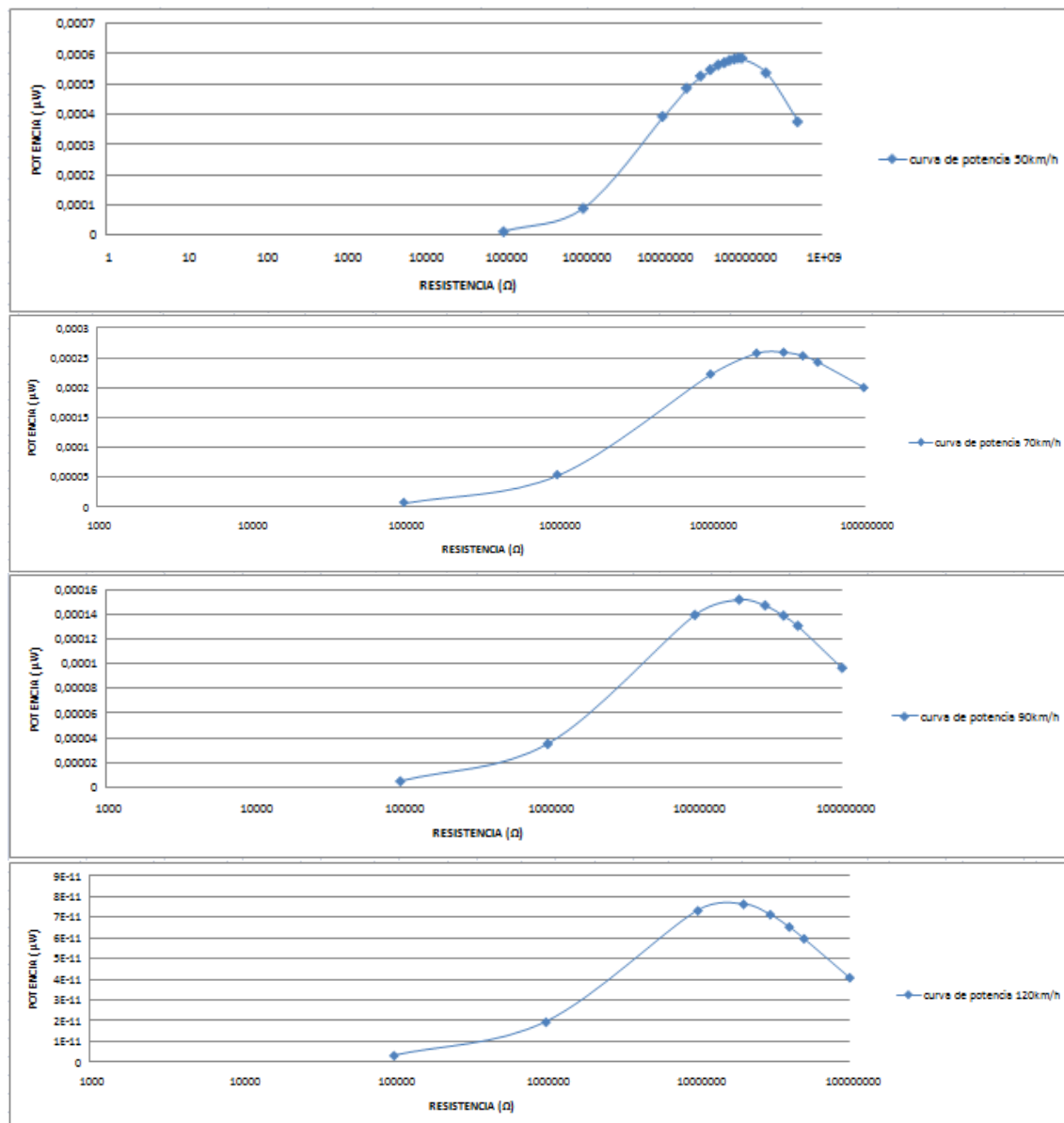


Figura 135: Curvas de potencia cable piezoeléctrico exterior enterrado velocidad 50 km/h, 70km/h, 90km/h y 120km/h.

El Último modelo estudiado como en los casos anteriores es el modelo del material piezoeléctrico de un encendedor comercial. En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos.

RL	Vmax (50km)	IL (50km)	Pmax (50km)	Vmax (70km)	IL (70km)	Pmax (70km)
1GΩ	235.57	2.3557E-07	5.54951E-05	172.64	1.7264E-07	2.98046E-05
5GΩ	733.56	1.4671E-07	0.000107622	637.02	1.27404E-07	8.11589E-05
10GΩ	1080.40	1.0804E-07	0.000116726	958.06	9.58057E-08	9.17873E-05
15GΩ	1296.97	8.6465E-08	0.000112142	1154.70	7.698E-08	8.88888E-05
20GΩ	1424.62	7.1231E-08	0.000101477	1286.06	6.43032E-08	8.26981E-05
25GΩ	1532.36	6.1294E-08	9.39251E-05	1378.80	5.51518E-08	7.60432E-05
30GΩ	1605.18	5.3506E-08	8.58868E-05	1449.10	4.83034E-08	6.99966E-05
35GΩ	1661.59	4.7474E-08	7.88823E-05	1503.88	4.29679E-08	6.46185E-05
C.Abierto	2105.55	2.1056E-27	4.43335E-24	1944.99	1.94499E-27	3.78298E-24
RL	Vmax (90km)	IL (90km)	Pmax (90km)	Vmax (120km)	IL (120km)	Pmax (120km)
1GΩ	148.16	1.4816E-07	2.19526E-05	95.96	9.596E-08	9.20832E-06
5GΩ	557.90	1.1158E-07	6.22508E-05	391.56	7.8312E-08	3.06638E-05
10GΩ	852.64	8.5264E-08	7.26998E-05	634.25	6.3425E-08	4.02273E-05
15GΩ	1034.89	6.8992E-08	7.13992E-05	780.28	5.20187E-08	4.05891E-05
20GΩ	1158.72	5.7936E-08	6.71314E-05	885.05	4.42527E-08	3.9166E-05
25GΩ	1248.34	4.9934E-08	6.23344E-05	971.00	3.88402E-08	3.7714E-05
30GΩ	1316.21	4.3874E-08	5.77473E-05	1038.14	3.46048E-08	3.59248E-05
35GΩ	1369.39	3.9126E-08	5.35783E-05	1101.50	3.14714E-08	3.46658E-05
C.Abierto	1807.60	1.8076E-27	3.26742E-24	1633.00	1.633E-27	2.66669E-24

Tabla 63: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un encendedor comercial con distancia de seguridad.

El valor de la pendiente de la curva de regulación y por tanto el valor de Ro es:

Velocidad 50km/h:

$$m = 9.35 \text{ G}\Omega$$

Velocidad 70km/h:

$$m = 10.26 \text{ G}\Omega$$

Velocidad 90km/h:

$$m = 11.2 \text{ G}\Omega$$

Velocidad 120km/h:

$$m = 13.08 \text{ G}\Omega$$

A continuación se muestran las 4 curvas de regulación:

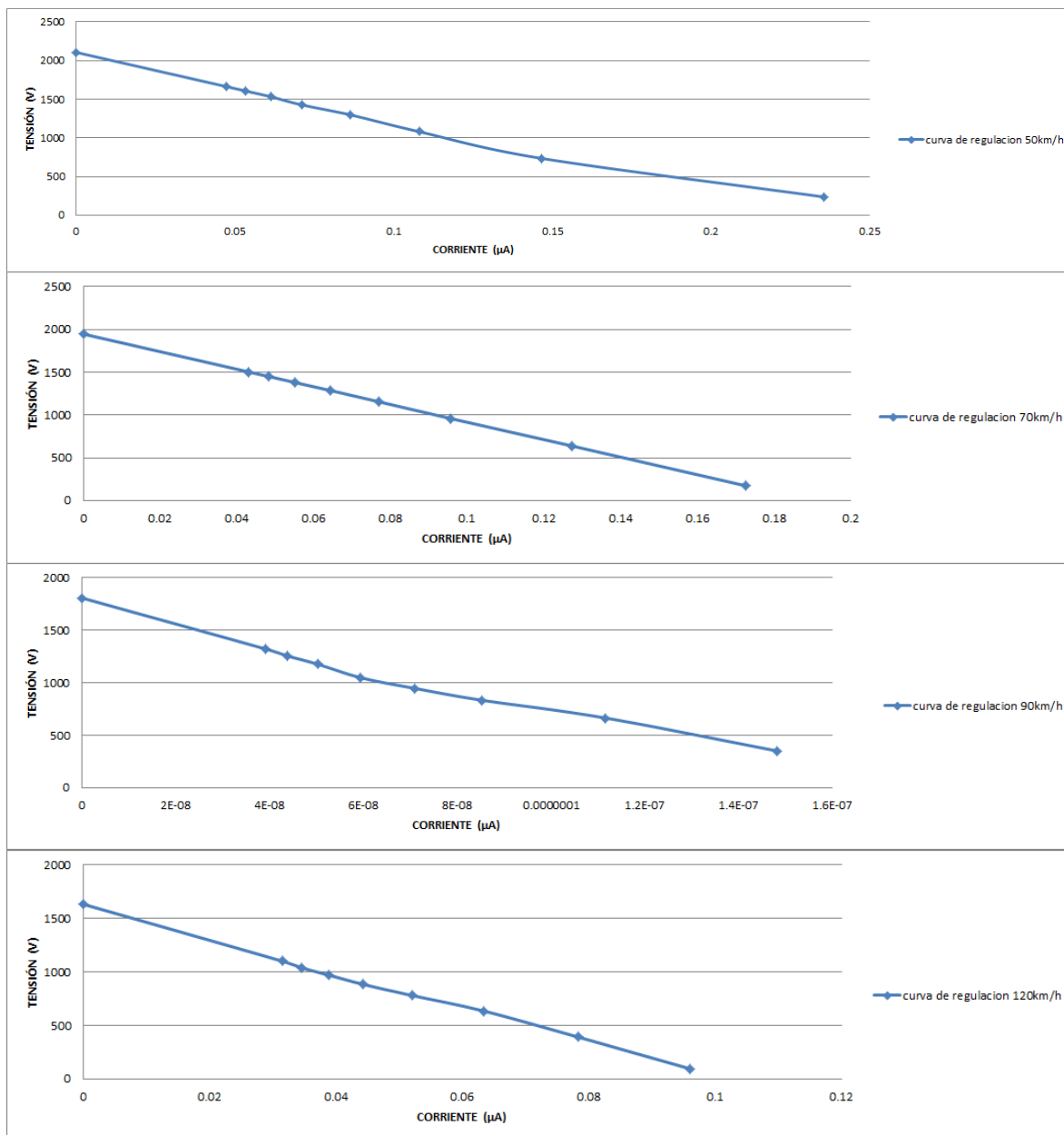


Figura 136: Curvas de regulación encendedor comercial velocidad 50km/h 70km/h, 90km/h y 120km/h.

La potencia que se obtiene como máximo en los cuatro casos es:

Potencia máxima 50km/h:

$$P_{\max} = 118,5 \mu W$$

Potencia máxima 70km/h:

$$P_{\max} = 92,1 \mu W$$

Potencia máxima 90km/h:

$$P_{\max} = 72,9 \mu W$$

Potencia máxima 120km/h:

$$P_{\max} = 50,9 \mu W$$

A continuación se muestran las curvas de potencia de los cuatro casos:

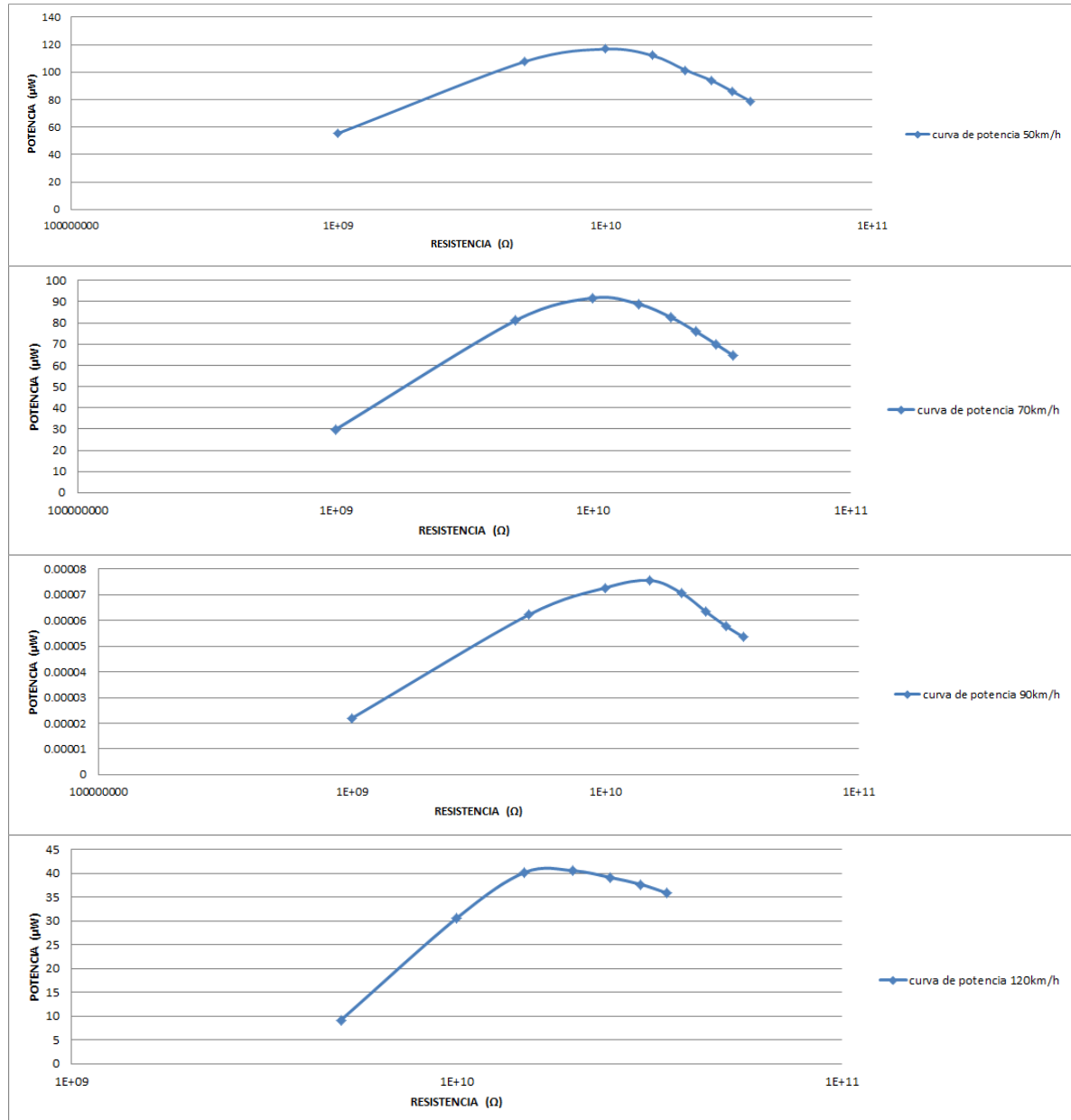


Figura 137: Curvas de potencia encendedor comercial velocidad 50km/h 70km/h, 90km/h y 120km/h.

3.5.2 Comparación de resultados.

Una vez obtenido todos los valores de los 5 modelos estudiados teniendo en cuenta la distancia de seguridad en cuatro velocidades, 50km/h, 70 km/h, 90km/h y 120km/h, vamos ha compararlos con los modelos obtenidos originalmente para poder extraer conclusiones. Las conclusiones que se puedan extraer de este estudio no serán del todo fiables debido a que las señales con las que se han creado los modelos con los que se ha realizado el estudiado han sido creadas a partir de las originales. Las señales creadas simulan el tiempo de paso entre vehículos y entre los ejes del vehículo pero la anchura y altura de cada pulso no se puede saber porque depende de varios factores que no podemos controlar.

A continuación se muestran cinco tablas donde se puede ver el efecto que puede tener la distancia de seguridad con respecto al modelo original.

modelo	Voc	R0	Pmax	comparacion en veces con un cable		
				Voc	R0	Pmax
1 cable	3.04 V	27.707 MΩ	830 nW			
1 cable 50km/h	1.24 V	100.85 MΩ	3.81 nW	2.452	3.640	217.848
1 cable 70km/h	0.945 V	87.47 MΩ	2.55 nW	3.217	3.157	325.490
1 cable 90km/h	0.704 V	78.82 MΩ	1.57 nW	4.318	2.845	528.662
1 cable 120km/h	0.235 V	27 MΩ	0.51 nW	12.936	0.974	1627.451

Tabla 64: Comparación resultados del modelo de cable con amplificación mecánica.

modelo	Voc	R0	Pmax	comparacion en veces con un cable		
				Voc	R0	Pmax
1 cable	0.562 V	25.105 MΩ	3.15 nW			
1 cable 50km/h	0.055 V	14.69 MΩ	51.48 pW	10.218	0.585	61.189
1 cable 70km/h	0.037 V	13.77 MΩ	24.85 pW	15.189	0.548	126.761
1 cable 90km/h	0.029 V	13.25 MΩ	16.19 pW	19.379	0.528	194.565
1 cable 120km/h	0.021 V	12.79 MΩ	8.99 pW	26.762	0.509	350.389

Tabla 65: Comparación resultados del modelo de cable sin amplificación mecánica.

modelo	Voc	R0	Pmax	comparacion en veces con un cable		
				Voc	R0	Pmax
1 cable	25.584 V	29.847 MΩ	5.48 μW			
1 cable 50km/h	22.725 V	79.14 MΩ	1.63 μW	1.126	2.652	3.362
1 cable 70km/h	22.143 V	99.22 MΩ	1.23 μW	1.155	3.324	4.455
1 cable 90km/h	21.202 V	114.78 MΩ	0.979 μW	1.207	3.846	5.598
1 cable 120km/h	20.526 V	147.14 MΩ	0.715 μW	1.246	4.930	7.664

Tabla 66: Comparación resultados del modelo de cable exterior al aire.

modelo	Voc	R0	Pmax	comparacion en veces con un cable		
				Voc	R0	Pmax
1 cable	1.472 V	20.55 MΩ	26.37 nW			
1 cable 50km/h	0.553 V	85.76 MΩ	891 pW	2.662	4.173	29.596
1 cable 70km/h	0.234 V	27.59 MΩ	496 pW	6.291	1.343	53.165
1 cable 90km/h	0.132 V	22.59 MΩ	192 pW	11.152	1.099	137.344
1 cable 120km/h	0.078 V	18.05 MΩ	85 pW	18.872	0.878	310.235

Tabla 67: Comparación resultados del modelo de cable exterior enterrado.

modelo	Voc	R0	Pmax	comparacion en veces con un cable		
				Voc	R0	Pmax
1 encendedor	2395.03 V	1.714 GΩ	836 μW			
1 encendedor 50km/h	2105.55 V	9.35 GΩ	118.5 μW	1.137	5.455	7.055
1 encendedor 70km/h	1944.99 V	10.26 GΩ	92.1 μW	1.231	5.986	9.077
1 encendedor 90km/h	1807.6 V	11.2 GΩ	72.9 μW	1.325	6.534	11.468
1 encendedor 120km/h	1633 V	13.08 GΩ	50.9 μW	1.467	7.631	16.424

Tabla 68: Comparación resultados del modelo encendedor comercial.

A la vista de los resultados obtenidos se pueden extraer varias conclusiones. La principal conclusión es que la tensión máxima es menor cuanto mayor es la distancia de seguridad. También se puede observar en los resultados que la disminución que se produce en la tensión máxima es menor si la tensión obtenida en el original es mayor.

La segunda conclusión que se puede extraer de los resultados es que la potencia que se puede obtener es menor cuando mayor es la distancia de seguridad, es decir, a mayor velocidad menor potencia se puede extraer. Al igual que la tensión la proporción en la que disminuye la potencia es mayor en los modelos en los que la tensión máxima es menor como en el caso de la tensión máxima.

Para finalizar no se puede extraer una conclusión clara del efecto que tiene la distancia de seguridad en el valor Ro. La conclusión que podemos sacar pero sin ser del todo fiable es que el valor de Ro va aumentando cuanto mayor es la distancia de seguridad si la tensión máxima es grande y disminuye si la tensión máxima es pequeña.

Capítulo 4

**Aplicación práctica utilizando
una cerámica piezoeléctrica**

4.1 Caracterización de un encendedor comercial basado en cerámica piezoeléctrica.

En este último capítulo se van a realizar primero unas pruebas prácticas de acumulación de energía con dos y tres encendedores y en la segunda parte se va a analizar un circuito práctico que es capaz de alimentar sensores de un consumo pequeño.

Antes de empezar a analizar los circuitos se va a mostrar el modelo del encendedor con el que se ha trabajado en estos circuitos. Se ha cambiado el modelo del encendedor debido a que fue imposible encontrar encendedores de la misma marca y modelo. El valor de la capacidad interna del material piezoeléctrico de este nuevo encendedor es el mismo valor que el modelo del encendedor utilizado anteriormente que es de 50pF.

Para poder capturar la señal proveniente del material piezoeléctrico del encendedor se ha usado una sonda diferente a la anterior. Esta sonda es de la marca STACK modelo cp: 241 que unido al osciloscopio tienen una resistencia equivalente de 10 M Ω en paralelo con una capacidad interna de 4 pF. El circuito para la adquisición de la señal es la siguiente:

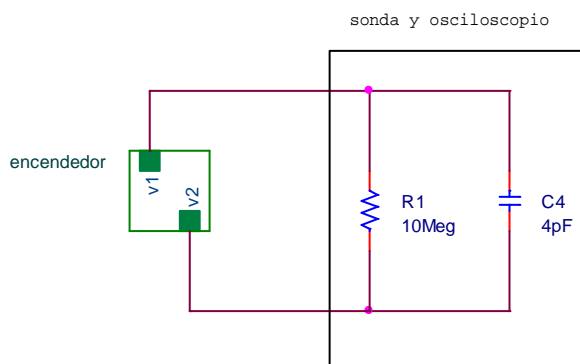


Figura 138: Circuito para obtener la señal encendedor

Una vez obtenido la señal trabajamos con los demás modelos y obtenemos todos los armónicos necesarios para la reconstrucción de la señal con el programa diseñado en LABview, teniendo en cuenta los valores de la resistencia y capacidad del osciloscopio. Para la caracterización del modelo de este encendedor se ha procedido como en las anteriores ocasiones. En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos para realizar la caracterización de este modelo.

RL	Vmax	IL	PL
100 MΩ	332.01	3.32006E-06	0.001102279
1 GΩ	2224.99	2.22499E-06	0.004950578
1.5 GΩ	2820.49	1.88033E-06	0.005303447
1.7 GΩ	3010.99	1.77117E-06	0.005332983
2 GΩ	3256.39	1.6282E-06	0.005302046
2.5 GΩ	3589.49	1.4358E-06	0.005153786
3 GΩ	3851.99	1.284E-06	0.004945953
10 GΩ	5177.00	5.177E-07	0.002680131
C.abierto	6466.50	6.4665E-27	4.18156E-23

Tabla 69: Valores para la construcción de la curva de regulación y potencia de la señal proveniente de un encendedor comercial nuevo.

Para conseguir obtener estos valores se ha utilizado el circuito de la figura que se ha realizado con el programa ORCAD. Si este circuito se realizara en la realidad harían falta más diodos porque la tensión de ruptura del diodo 1N4007 es de 1000V, pero el modelo utilizado en ORCAD es de 1500V.

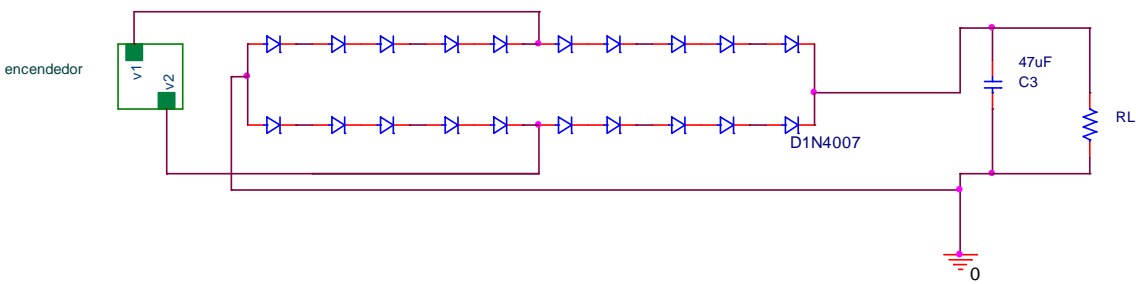


Figura 139: Circuito para la caracterizar del encendedor

El valor de la pendiente de la curva de regulación y por tanto el valor de R_o es de $1.7299\text{ G}\Omega$.

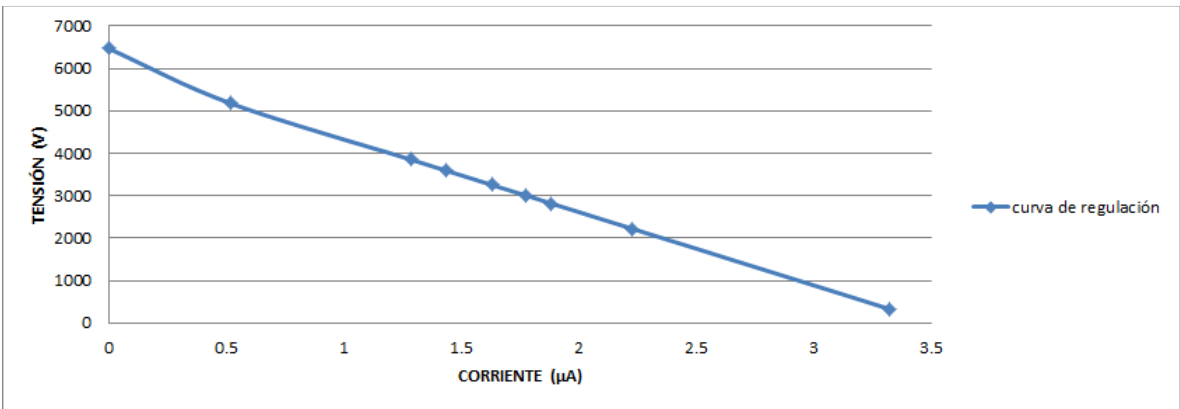


Figura 140: Curva de regulación encendedor comercial.

Con el material piezoeléctrico de este encendedor comercial se puede conseguir una potencia máxima de 6mW. Con el encendedor que trabajamos ahora se consigue una potencia mayor que con el primer modelo de encendedor que se trabajo, esto se debe a que con este encendedor se obtiene una tensión máxima casi 3 veces superior y el valor de R_o es prácticamente el mismo en los dos casos.

En la siguiente imagen se muestra la curva de potencia del material piezoeléctrico del modelo del encendedor con el que se va ha trabajar a partir de ahora.

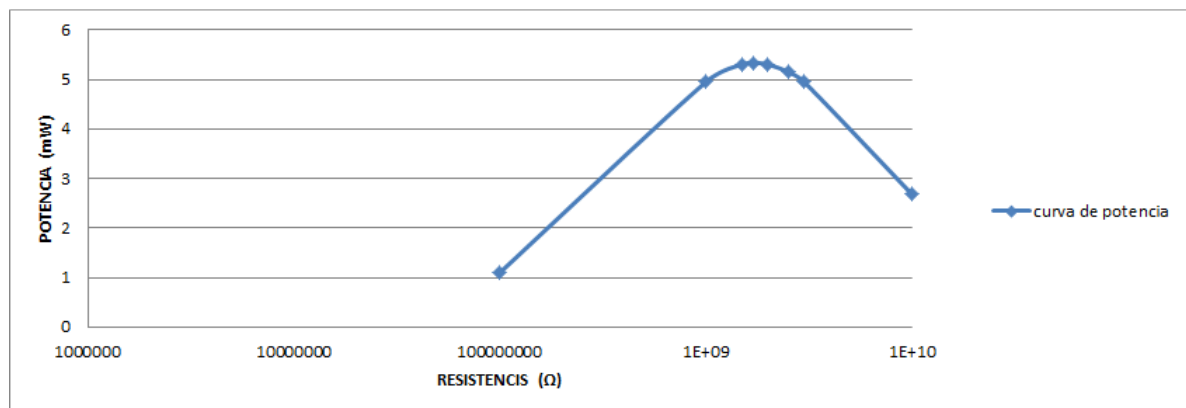


Figura 141: Curva de potencia encendedor comercial.

4.2 Pruebas prácticas

Los primeros circuitos prácticos han sido unos circuitos sencillos para poder comprobar la tensión capaz que se puede acumular en el condensador y comprobar que el modelo simulado reproduce el efecto con un error que no sea significativo. Para realizar estas pruebas se han instalado 3 encendedores comerciales, después se añadió un cuarto encendedor. Estos encendedores comerciales son de la misma marca y modelo que el caracterizado en el punto anterior.

La primera prueba práctica se ha realizado con dos encendedores comerciales. Para realizar las pruebas prácticas hay que tener en cuenta que los encendedores comerciales están recién instalados en el banco de ensayos y con el paso de las rudas se hunden poco a poco hasta que se quedan situados en un sitio fijo. Otra circunstancia ha tener en cuenta es el inflado de las ruedas que con el uso de banco de ensayos se van deshinchando. Por estas dos circunstancias las tensiones que se van a obtener en cada ensayo de cada prueba será menor que la obtenida en el caso anterior. Este efecto se puede ver perfectamente en las siguientes gráficas donde se muestran las señales obtenidas de los encendedores recién instalados y la segunda es de los mismos encendedores pero 6 días y 3 ensayos después.

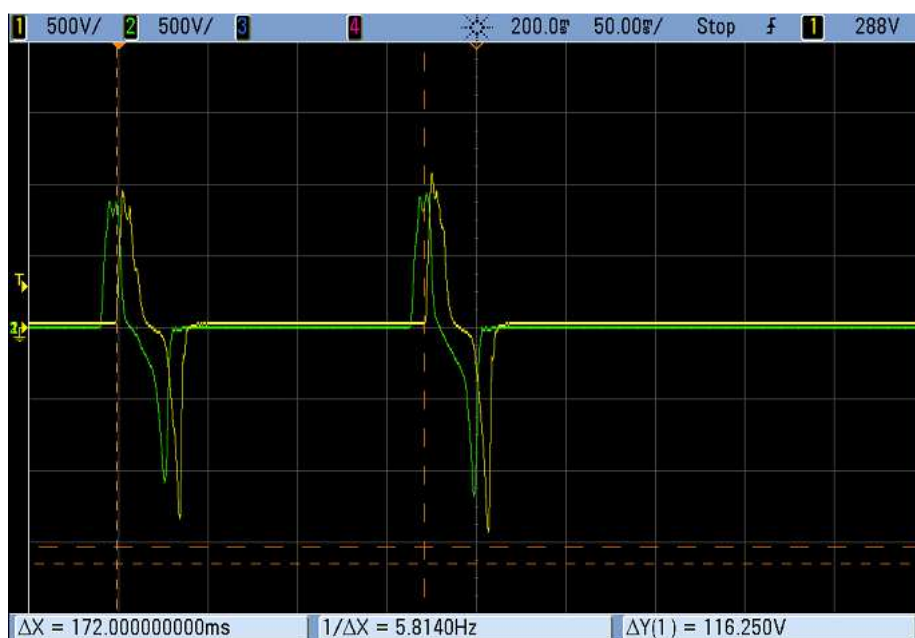


Figura 142: Señal obtenida de dos encendedores recién instalados.



Figura 143: Señal obtenida de dos encendedores después de varios ensayos.

En la gráfica se puede observar que el periodo es prácticamente el mismo, no es el mismo debido a la posición en que se han colocado los cursores. Pero lo más importante que se puede observar es la disminución de los picos de tensión, en el canal que aparece en verde la primera vez se obtuvo un pico de tensión máximo de 1072.7V y en la segunda medida se obtuvo un pico de tensión de 810.55V. En el canal amarillo se obtuvo la primera vez una tensión máxima de pico de 942.38V y en la segunda medida se obtuvo de 808.79V.

Una vez obtenidas las señales se han creado los dos modelos de cada uno de los encendedores utilizados. Para obtener la medida se ha realizado el siguiente circuito en la realidad y simulado en ORCAD.

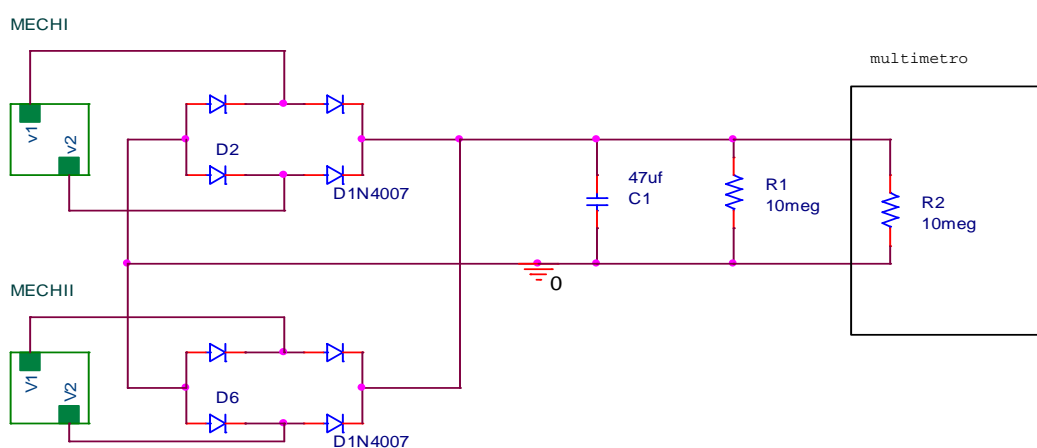


Figura 144: Circuito con dos encendedores.

numero	tension medida	tiempo	tension simulada
1º	39.1V	1 h 40 m	47.5525 v
2º	36.1 V	2 h	48.488 V
3º	35.6 V	1h 30m	33.939 V
4º	32.1 V	1 h	32.3375 V

Tabla 70: Resultados de la primera prueba practica.

Los modelos de los mecheros han variado según el ensayo que se ha realizado. En la captura de las señales de los encendedores se observó que el osciloscopio introduce un offset diferente dependiendo del canal, en la primera medida simulada se ha quitado el offset de la señal y en la segunda el offset no se ha quitado, como se puede ver en la tabla esto provoca que la tensión obtenida la segunda vez es mayor. Otra cosa a tener en cuenta es que la señal con la que se parte para realizar los dos modelos es la señal obtenida recién instalados los dos encendedores en el banco de ensayos, esto junto con el hecho de que los modelos realizados se han hecho con un error aproximado de un 3% provoca que la diferencia con la tensión real obtenida.

La medida número 3 simulada se ha creado a partir de las señales obtenidas de los encendedores después del tercer ensayo real, este modelo se ha creado al igual que anteriormente con un 3% de error por eso hay una diferencia entre la señal simulada y real. Por último en la cuarta tensión simulada se ha utilizado la misma señal que en la medida 3 para crear los modelos pero estos modelos se han creado con todos los armónicos posibles en este caso 698, como se puede ver en los resultados el resultado es prácticamente el mismo en la tensión real y en la simulada. La diferencia entre las dos tensiones es debido a la variación de la presión de inflado de las ruedas y del movimiento que han podido sufrir en los encendedores durante la realización de los ensayos. El efecto de la variación de presión de inflado de las ruedas y la posición en la que se encuentre el encendedor se puede observar en las tensiones reales obtenidas, la tensión obtenida es menor cuantas más pruebas se han hecho.

Para realizar la segunda prueba práctica se han utilizado tres mecheros. Como se ha podido comprobar en la prueba anterior la tensión que se va a obtener irá disminuyendo hasta que los mecheros se estabilicen, la tensión también depende del estado de las ruedas, el efecto es notorio con el paso del tiempo. Para realizar esta segunda prueba se ha utilizado el siguiente circuito.

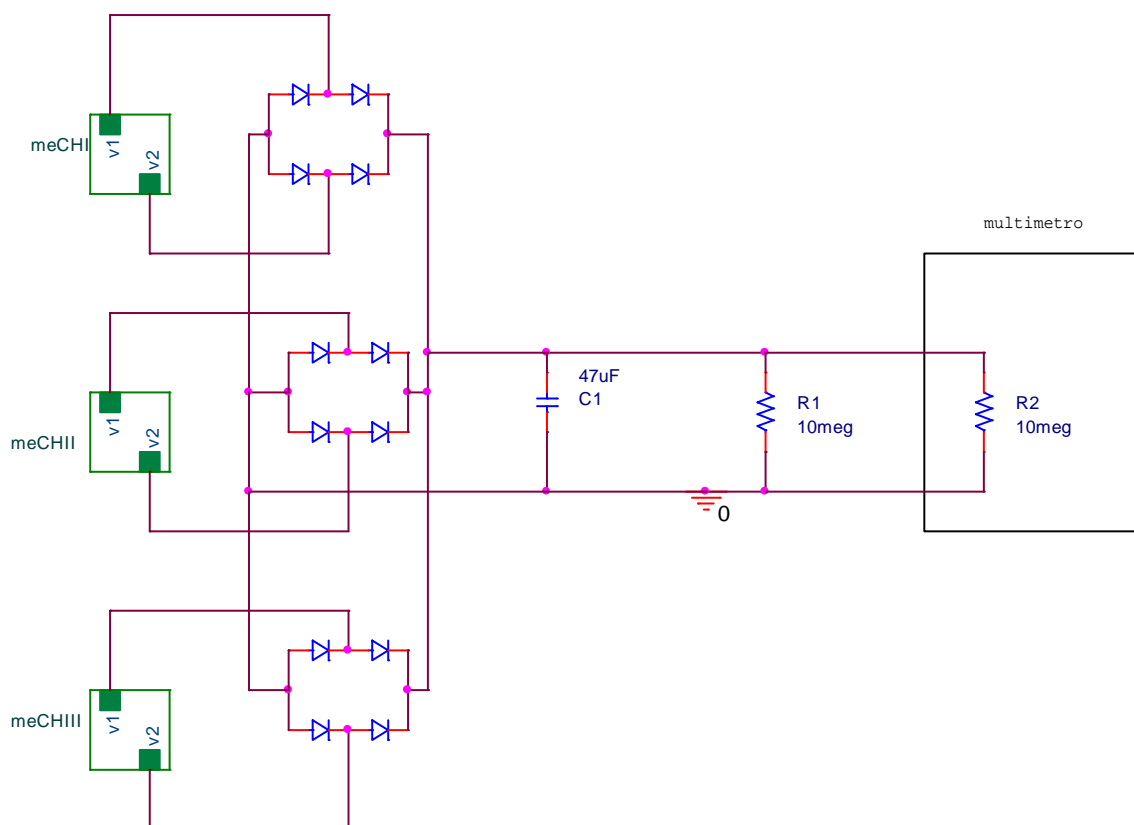


Figura 145: Circuito tres encendedores con puente de diodos.

Las medidas obtenidas son las siguientes.

número	tensión medida	tiempo	tensión simulada
1º	46.1 V	1h 30m	53.39 V
2º	44.9 V	1h 20m	49.24 V
3º	44.4 V	1h 20m	
4º	38.6 V	1h 30m	38.55 V
5º	39.4 V	1h 20m	
6º	38 V	1h 20m	
7º	38.4 V	1h 30m	

Tabla 71: Resultados de la segunda prueba practica.

En esta segunda prueba se ha decidido trabajar con modelos sin error, es decir, con todos los armónicos obtenidos del programa realizado en LabVIEW. Esto es posible porque son pocos encendedores pero si fuera una cantidad grande de encendedores las simulaciones serian interminables debido a que cada encendedor esta compuesto por 698 armónicos. Para la creación de los modelos de la primera simulación se ha utilizado la señal obtenida recién instalados los tres encendedores y la segunda medida los modelos se han creado a partir de la señal obtenida justo después del primer ensayo. Como se puede ver en la tabla de resultados las medidas simuladas y reales se diferenciaban bastante y se decidió realizar varios ensayos hasta que se estabilizaran los mecheros. Para realizar la última medida simulada los modelos de los encendedores se han creado a partir de la señal capturada de los encendedores después del quinto ensayo realizado en el banco de ensayos. Como se puede observar las últimas cuatro medidas obtenidas en el circuito y la medida simulada es prácticamente la misma, porque los encendedores ya se han mantenido en una posición fija.

La ultima prueba realizada también se ha realizado también con tres mecheros la única diferencia es la etapa de rectificación, en las dos primeras esta etapa era un puente de diodos y en este caso esta etapa esta formada por dos diodos. En esta prueba se ha realizado dos ensayos principales, en el primero cada encendedor tiene su propio circuito rectificador como se ve en el circuito de la figura.

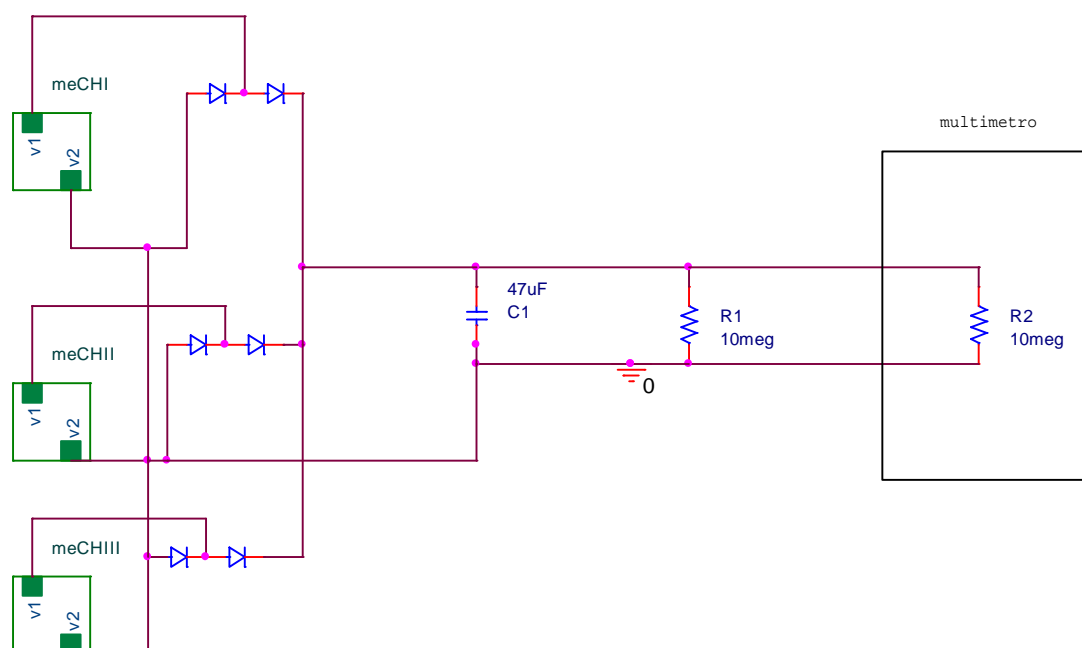


Figura 146: Circuito tres encendedores con dos diodos cada uno.

En el segundo ensayo los tres encendedores comparten el mismo circuito rectificador como se puede ver en la figura.

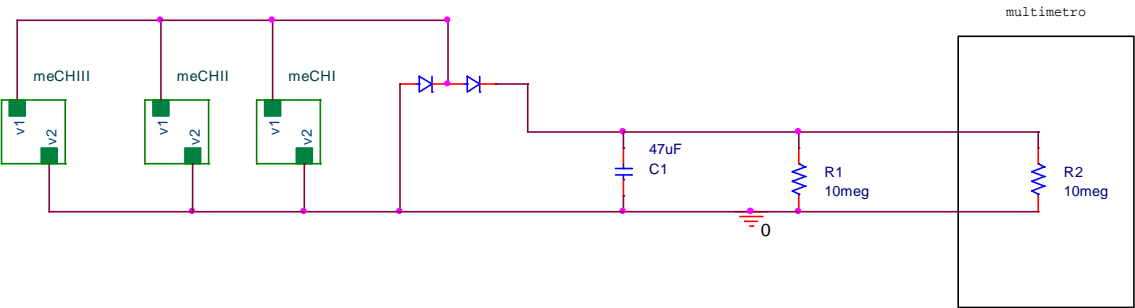


Figura 147: Circuito tres encendedores con dos diodos para los tres.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

etapa rectificadora	numero	tension medida	tiempo	tension simulada
cada uno con la suya	1º	19.39 V	1 h 30 m	19.478 V
todos con la misma	1º	18.80 V	1 h 30 m	19.228 V
	2º	17.80 V	1 h 30 m	
	3º	17.40 V	1 h 30 m	

Tabla 72: Resultados de la tercera prueba practica.

Los modelos utilizados para las simulaciones de esta prueba son los mismos que se utilizaron en el último ensayo de la prueba anterior. Como se puede ver la tensión real y simulada con un circuito rectificador es prácticamente igual, en el caso de un circuito rectificador para los tres encendedores la diferencia es mayor porque desde que se realizo la captura para la creación de los modelos y los ensayos realizados pasaron varios días y las ruedas perdieron algo de presión.

La conclusión que se puede sacar de las pruebas realizadas es que si creamos los modelos con todos los armónicos posibles el error en las tensiones obtenidas son muy pequeñas. En cambio si los modelos utilizados tienen un poco de error la tensión simulada es algo mayor que la real debido a que el ruido de la señal ha aumentado.

4.3 Aplicación práctica.

Por último se ha intentado realizar una aplicación práctica que sea capaz de alimentar sensores de pequeño consumo, carga de baterías.... En este caso se ha pensado que la aplicación sea capaz de alimentar la aplicación diseñada en el PFC “Alimentación Energy Harvesting basada en fuentes piezoeléctricas”.

El circuito el que se ha pensado para esta aplicación es el siguiente:

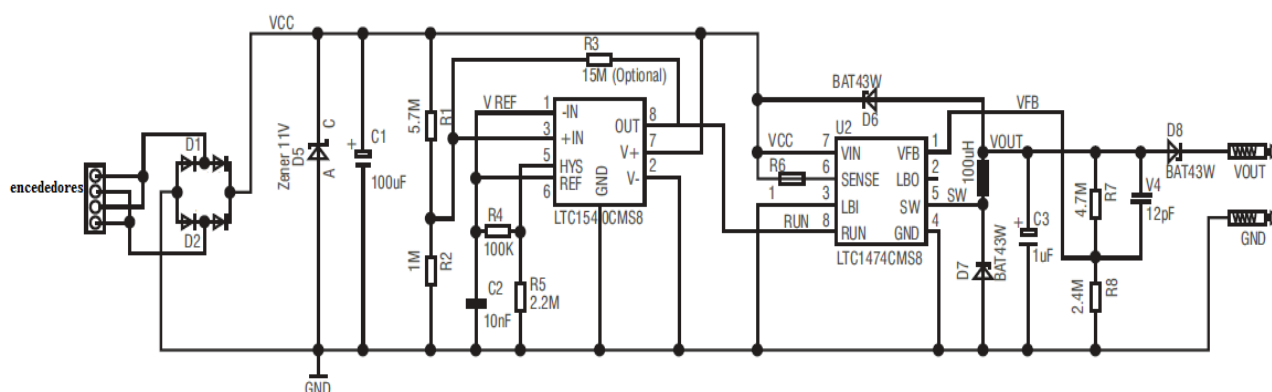


Figura 148: Circuito para alimentar un sensor o circuito

El circuito está formado principalmente por una etapa rectificadora por cada encendedor, esta etapa es un puente de diodos, un comparador de bajo consumo LTC1540 y un convertidor LTC1474. El condensador C1 se va cargando lentamente. El punto de funcionamiento de máxima transferencia de potencia se dará si la impedancia equivalente de entrada de este circuito iguala la R_o que tiene el circuito rectificador más C1, así tendrá que la tensión V_{cc} alcanzará $V_{oc}/2$, siendo este el punto (más la histéresis programada) en el que el comparador LTC1540 habilita el funcionamiento del comparador DC/DC. Cuando la tensión de C1 cae por debajo de la tensión inferior de histéresis del comparador este desactiva su salida hasta que el condensador se vuelva a cargar. Esto provoca que C1 tenga siempre una tensión aproximada de $V_{oc}/2$. Como la tensión de C1 se mantiene prácticamente constante hace que el material piezoeléctrico no se vea afectado por la activación del convertidor o por la variación de carga. El diodo zener D5 fija una tensión a un valor seguro para que los integrados no se dañen por tensiones superiores a su V_{cc} que en este caso es de 11V que es la tensión del comparador.

La tensión que proporciona el convertidor viene dada por la relación de las resistencias R7 y R8. La potencia entregada por el convertidor se mantendrá relativamente constante si la carga es capaz de consumir la potencia entregada. R6 establece la corriente máxima a través de la inductancia L1 como se puede ver en la siguiente ecuación.

$$R6 = \left(\frac{0.067}{I_{max}} \right) - 0.25$$

I_{max} es la corriente máxima de salida que se quiere entregar a la carga. Habitualmente el valor de L1 en pequeños convertidores será menor de 300uH.

A la hora de diseñar el circuito hay que tener en cuenta las pérdidas que se pueden producir en los diferentes puntos del circuito. Las primeras pérdidas se producen por las corrientes de fuga en C1, en el convertidor y en las R1 y R3. Para que esta pérdida sea lo menor posible el valor de R1 y R3 debe ser lo suficientemente grande. Las demás pérdidas solo se producen cuando el convertido LTC1474 está activo. Estas pérdidas se producen dentro del convertidor y dependen del valor de V_{IN} del convertidor y por último las últimas pérdidas que se pueden tener en cuenta son las que se producen en el diodo D7.

Para diseñar este circuito de forma óptima se necesitan saber 3 cosas.

1. Tensión de salida requerida
2. Corriente de salida requerida
3. Y la tensión Voc del material piezoeléctrico.

Para determinar la tensión de salida se puede extraer por la siguiente ecuación

$$V_{OUT} = 1.23 \left(1 + \frac{R7}{R8} \right) - V_f$$

V_f es la tensión que se cae en el diodo D8 cuando hay carga. Teniendo en cuenta que esta tensión es de 0.66V y que V_{out} que queremos obtener es de 3V la relación que tiene que tener R7 y R8 es la siguiente R7=1.97R8 con los valores que hay en la figura esta relación se cumple.

El segundo apartado a calcular sería R6. Para hallar este valor usamos la ecuación explicada anteriormente teniendo en cuenta que el circuito al que queremos alimentar consume 270µA/MHz y trabaja a 16 Mhz cuando esta activo, por tanto la corriente máxima es de 3.7mA. R6 tiene un valor de 18Ω

$$R6 = \left(\frac{0.067}{I_{max}} \right) - 0.25$$

Por último para acabar de elegir los componentes necesarios para realización del circuito faltan por elegir las resistencias R1-R5. El comparador LTC1540 tiene una histéresis interna programable de 100mv. Para los valores que se ven en la figura la corriente que sale del pin 6 del comprador es 0.5 µA= Vref/(R4+R5) con lo que el valor de histéresis es el siguiente.

$$Histeresis = \frac{2 \cdot 0.5\mu A}{R4}$$

Para elegir el valor de R1 se escoge un valor para que la corriente que pase por ella en el punto de disparo sea sustancialmente mayor que la de fugas de la entrada del comparador, normalmente 1nA. Escogiendo el valor de 5.7MΩ es suficiente para que se cumpla. Otra opción para calcular para calcular R1 es utilizando la siguiente ecuación en la que se tiene en cuenta la máxima corriente que pasa por la resistencia.

$$R1 = \frac{Vc - \left(\frac{Vhisteresis}{2} \right) - 1.182}{I_{R1}}$$

R2 se elije para ajustar el valor de la tensión centro sin tener en cuenta la influencia de R3. Para calcular R3 se usa la siguiente ecuación.

$$R2 = \frac{1.182 \cdot R1}{Vc - 1.182}$$

Para obtener un valor de Vc de 7.2, se centra en este valor de tensión para que el disparo se produzca cuando el condensador tenga suficiente carga para poder alimentar todo el circuito durante un tiempo suficiente, en este caso R2 debe vale 1MΩ.

Por último R3 es opcional, esta resistencia se utiliza para ajustar las histéresis, esta resistencia no afecta en el cálculo de Vc si esta tensión es mayor de 3.3V. Para este caso el valor de R3 es de 15MΩ.

Este circuito se pensó en realizarlo antes de sacar la caracterización del encendedor nuevo pero una vez caracterizado se comprobó que el circuito no podría funcionar con tan solo cuatro mecheros debido a que los cuatro mecheros colocados en paralelo se pueden dar 15μA y solamente el convertidor LTC1474 puede consumir 175 μA cuando esta activo. Para obtener la corriente que puede entregar los 4 encendedores no ha hecho falta simularlo solo con la caracterización de uno se puede hallar. Voc es la misma para un encendedor que para N en paralelo en este caso 4 y R0 se divide entre el número de encendedores en paralelo.

$$R_0 = \frac{R_{01 \text{ encendedor}}}{N} = \frac{1730}{4} = 432 M\Omega$$

Para obtener la máxima corriente que puede entregar los cuatro encendedores se calcula la corriente que entregan en 0.

$$V - V_{oc} = -432 \cdot 10^6 \cdot i_{cc} \rightarrow i_{cc} = \frac{6466}{432 \cdot 10^6} = 14.96 \mu A$$

Ante la imposibilidad de instalar más encendedores en el banco de ensayos el circuito completo no funcionaria, con los 4 encendedores conectados en paralelos solo podríamos hacer funcionar la parte del circuito hasta para que active el comparador debido a que este solo consume 0.71μA.

Otra complicación para hacer funcionar el circuito es que los integrados tienen que tener una tensión máxima de alimentación de 11V. Por tanto con los calculados anteriormente el circuito tiene un margen de alimentación de 7.2V a 11V. Como se explico anteriormente para que se aproveche toda la máxima energía del material piezoeléctrico se tendría que trabajar en Voc/2 que en nuestro caso es de 3233 V, para poder trabajar en ese punto se ha decidido poner unas resistencias para que provoquen la caída de tensión y se pueda trabajar en ese punto. Las resistencias que se añaden forman un divisor de tensión con R1 y R3 para que la tensión en el circuito sea de 11 voltios. Para que el circuito trabaje en la zona de máxima potencia de los encendedores la R formada por las añadidas y R1 mas R2 tiene que tener un valor de 432MΩ, en la siguiente ecuación se halla el valor de la suma de R1 y R2.

$$3233 \cdot \frac{R_{1+2}}{432 \cdot 10^6} = 11V \rightarrow R_{1+2} = 1.47 M\Omega$$

Como se vio antes primero se elige R1 que en este caso escogemos 1.2 MΩ y R2 tiene un valor de 270 KΩ. La R que se añade tendrá un valor de 4.305 GΩ, hay que tener en cuenta que esta resistencia estará formada por varias resistencias para evitar que se estropeen debido a las tensiones que se pueden alcanzar. Esto también ocurre para C1 donde estará formado por varios condensadores para que puedan soportar las tensiones que se pueden alcanzar. La parte del circuito que pone puente son puentes donde cada rama esta formada por 4 diodos 1N4007.

La primera parte del circuito quedaría de la siguiente manera.

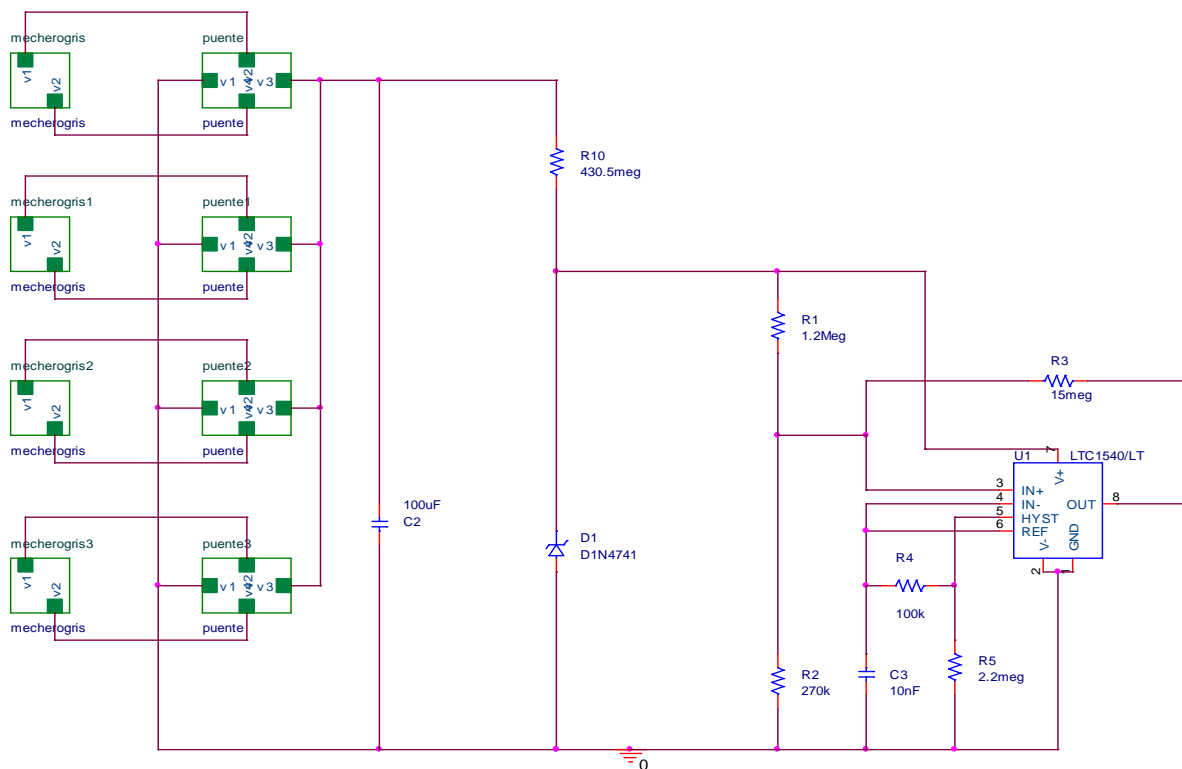


Figura 149: Parte del circuito hasta el comparador

En la siguiente gráfica se muestra la tensión que hay en las bornas del zener (verde) y la tensión que hay a la salida del comparador (roja).



Figura 150: grafica de la tensión del zener y la salida del convertidor.

No se puede simular el circuito completo por el programa ORCAD no tiene el modelo del convertidor LTC7414. Aunque no se pueda probar realmente por falta de espacio físico se va a calcular la asociación necesaria de encendedores para que pueda funcionar el circuito completo teniendo de carga la aplicación diseñada en el PFC “Alimentación Energy Harvesting basada en fuentes piezoeléctricas”. Para calcular el número hay que tener en cuenta que el circuito completo pedirá aproximadamente 3.7mA. Por tanto si mantenemos el criterio de trabajo en el punto de máxima potencia, la corriente que pide el divisor por R10 y R1+R2 debe ser muy pequeña y que toda la corriente se transmita al circuito final. Ésta corriente más la corriente que pedirá el circuito en funcionamiento debe ser aproximadamente 3,7mA para trabajar en punto de máxima potencia. En el caso anterior donde el circuito solo es hasta el comparador sólo se tiene en cuenta las corrientes que piden las resistencias por eso el valor de la suma de R10, R1 y R2 tiene que tener un valor aproximado de Ro.

Para trabajar en el punto de máxima potencia se tiene que cumplir que $R_o = R_L$ equivalente, calculamos el valor de Ro para trabajar en $V_{oc}/2$, con lo que el cálculo es el siguiente:

$$R_o = \frac{3233}{3.7 \cdot 10^{-3}} = 875K\Omega$$

Una vez que tenemos R_0 ya podemos saber el número de encendedores que nos hace falta solo tenemos que dividir R_0 de un encendedor por la R_0 que acabamos de calcular en este caso nos harían falta 1976 encendedores asociados en paralelo. Por último faltaría hallar el valor de las resistencias R_{10} , R_1 y R_2 que se mostraron en la figura del circuito explicado anteriormente. Para realizar el cálculo de estas resistencias fijamos un valor R_{10} muy alto para que la que la corriente sobre las resistencias sea mínima, en este caso se ha pensado en $100\text{G}\Omega$, siguiente ecuación se halla el valor de la suma de R_1 y R_2 .

$$3233 \cdot \frac{R_{1+2}}{100 \cdot 10^9 + R_{1+2}} = 11V \rightarrow R_{1+2} = 34.14\text{M}\Omega$$

Teniendo en cuenta que R_1 es 5,7 veces más grande que R_2 para que se siga cumpliendo esta relación R_2 tiene un valor de $5\text{M}\Omega$ y R_1 tiene un valor de $29\text{M}\Omega$. Los demás componentes del circuito mantendrían el mismo valor.

Conclusiones

Como se ha podido comprobar a lo largo de este proyecto se han cumplido los objetivos inicialmente marcados en el estudio sobre las posibilidades de alimentación autónoma partiendo de una fuente de tipo piezoeléctrica, solamente se ha dejado de cumplir la realización de una aplicación que sea capaz de alimentar un pequeño sensor o batería debido al falta de espacio en el banco de ensayo.

Uno de los principales éxitos de este proyecto es la mejora de la obtención de los valores necesarios para la creación de los modelos eléctricos usando el lenguaje de programación LabVIEW. Con el programa realizado además de poder extraer un numero mayor de armónicos de la señal del material piezoeléctrico obtenida se pueden crear señales que simulen condiciones a las que están sometidos los materiales piezoeléctricos sin necesidad de tener que capturar las señales bajo esas condiciones.

Se ha realizado un estudio exhaustivo sobre la acumulación de energía de las diferentes señales extraídas de los cables coaxiales y el encendedor comercial se ha podido llegar a la conclusión de que caracterizando un material piezoeléctrico, se puede saber el comportamiento de cualquier asociación de ese material piezoeléctrico si necesidad de simularlo. También se estudiaron dos topologías rectificadoras comprobando que se obtenían la misma energía. Otra conclusión muy importante que se obtuvo de este estudio es que si se consigue amplificar el efecto del golpeo sobre el material piezoeléctrico la energía que se obtiene es bastante más. Por ultimo se estudio el efecto de la distancia de seguridad sobre la potencia que se puede obtener, con este estudio se comprobó que la energía obtenida es menor cuanto mayor es la velocidad debido al aumento de esta distancia de seguridad.

Por ultimo se ha realizado una parte práctica de donde se pudo comprobar que si el modelo se ha creado con todos los armónicos posibles el resultado de las simulaciones es prácticamente idéntico al resultado que se obtiene en la realidad. El único lunar que ha tenido este proyecto es que no se pudo realizar una aplicación práctica capaz de alimentar algún sensor o batería debido a la imposibilidad de instalar más encendedores en el banco de ensayos.

Por último, cabe destacar las posibles mejoras que se pueden implementar para ampliar este proyecto en un futuro.

Una de las mejoras posibles que se pueden realizar es la modificación del programa creado en labVIEW para poder obtener las señales directamente de la tarjeta de adquisición de datos del banco de ensayos sin necesidad de trabajar con el osciloscopio.

Otra posible mejora es encontrar un material piezoeléctrico que sea capaz de entregar mas energía para poder realizar la aplicación practica propuesta en este proyecto o la realización de otra aplicación que sea capaz de alimentar pequeños sensores o circuitos. Debido a las limitaciones de espacio físico del banco de ensayos el material con el que se trabaje además de la potencia que se obtiene de él habría que pensar en la ocupación física para poder instalar el mayor número posible.

Bibliografía

Documentación online

- Banco de ensayos para materiales piezoeléctricos en aplicaciones viales. Manuel Vázquez, F. J. Jiménez, J. de Frutos. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol 50, 2, paginas 65-72, Marzo-Abril 2011.

<http://boletines.secv.es/upload/2011042981246.20115065.pdf>

- Productos y aplicación de energy harvesting.

http://www.mide.com/products/vulture/vulture_catalog.php

- Texas Instruments©: Energy Harvesting.

<http://www.ti.com/ww/en/apps/energy-harvesting/index.shtml>

- Linear Technologies©: Energy Harvesting.

http://www.linear.com/products/energy_harvesting

- BOE 2 de febrero del 2000.

<http://www.boe.es/boe/dias/2000/02/02/pdfs/A04724-04778.pdf>

Bibliografía

- Electrónica, Allan R. Hambley. ISBN: 84-205-2999-0. Editorial Prentice-Hall. 2ª edición.
- Transformadores, Pedro Daga Gelabert, Enrique Oñós pRados. ISBN: 84-329-6004-7. Ediciones CEAC.
- National Instrument. LabVIEW™ Intermediate I: Successful Development Practices Course Manual. National Instrument. 2004.

PFC consultado:

- “Alimentación Energy Harvesting basada en fuentes piezoeléctricas”, Ignacio Ruano Martínez, Tutor: Manuel Vázquez Rodríguez. Octubre 2011.
- Alimentación autónoma: aplicación a fuente piezoeléctrica. Pablo Herranz Ramírez, Tutor: Manuel Vázquez Rodríguez. Octubre 2011.
- Banco de pruebas para sistemas autoalimentados en aplicaciones viales. Daniel Rodríguez Moronta, Tutor: Manuel Vázquez Rodríguez. Octubre 2011.

Anexo

Contribuciones de Fourier.

Tabla 73: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente del cable piezoeléctrico del banco de ensayos con amplificación mecánica.

Armónico	Frecuencia	Módulo medido	fase medida (°)	Módulo real	Fase real(°)
1	2.976191	0.072252	109.137079	0.56951233	26.45491302
2	4.464286	0.012143	-80.560013	0.06445189	-159.6567345
3	5.952381	0.102503	67.347293	0.41369697	-8.24828268
4	7.440476	0.018948	226.538800	0.06223449	154.3379409
5	8.928571	0.153466	0.842267	0.42859242	-68.08815454
6	10.416667	0.025197	170.928422	0.06170828	105.1307974
7	11.904762	0.192066	-56.151382	0.42203064	-118.9628437
8	13.392857	0.031611	120.531068	0.06343158	60.55412656
9	14.880952	0.223081	244.287896	0.4145317	-173.0077196
10	16.369048	0.035096	65.663976	0.06107665	10.89777894
11	17.857143	0.241417	187.222925	0.39712018	134.8377512
12	19.345238	0.038820	12.294552	0.0608207	-37.85282877
13	20.833333	0.254824	130.128902	0.3826968	82.08239417
14	22.321429	0.041944	-43.321649	0.06070479	-89.39716265
15	23.809524	0.256448	72.606303	0.35930862	28.37933553
16	25.297619	0.042612	266.700214	0.05802117	-135.7930974
17	26.785714	0.251896	15.489549	0.33442649	-25.37750103
18	28.273810	0.042971	212.883148	0.05578468	173.542253
19	29.761905	0.244515	-40.453541	0.31114444	-78.36139613
20	31.250000	0.042607	161.752507	0.05325687	125.1912078
21	32.738095	0.232408	262.491773	0.28588649	-132.8032154
22	34.226191	0.041050	108.419239	0.04977361	74.3161502
23	35.714286	0.215821	206.155508	0.25830792	173.1753319
24	37.202381	0.039547	55.768533	0.04677897	23.84731201
25	38.690476	0.197390	150.446905	0.23101294	119.5253302
26	40.178571	0.036498	2.855796	0.04230335	-27.12115579
27	41.666667	0.181448	94.768633	0.20845762	65.68522831
28	43.154762	0.034093	-49.482932	0.03885321	-77.7202324
29	44.642857	0.164425	38.476967	0.18600218	11.0416681
30	46.130952	0.030799	256.660970	0.03460504	-130.0133628
31	47.619048	0.145298	-18.388682	0.16223916	-44.34026008
32	49.107143	0.027306	203.840063	0.03031506	178.5756222
33	50.595238	0.126752	-74.935342	0.13997421	-99.54587913
34	52.083333	0.024548	149.485170	0.02697655	125.4975003
35	53.571429	0.111226	229.235188	0.12167282	-154.1586294
36	55.059524	0.020701	96.509410	0.02255031	73.68229051
37	56.547619	0.097626	172.417170	0.10592905	150.1313132
38	58.035714	0.018234	40.929578	0.01971216	19.16113121
39	59.523810	0.084322	114.760089	0.09085029	93.48666353

40	61.011905	0.015798	-16.447315	0.01696726	-37.24675382
41	62.500000	0.073108	57.149112	0.07828395	36.80387689
42	63.988095	0.013813	-73.317599	0.0147498	-93.22725421
43	65.476191	0.064419	-1.036785	0.06860854	-20.52840931
44	66.964286	0.012486	226.094684	0.01326537	-152.9954608
45	68.452381	0.057260	-60.175391	0.06069484	-78.87967996
46	69.940476	0.010622	165.476953	0.01123469	147.1437563
47	71.428571	0.049881	240.803661	0.05265113	-137.1724035
48	72.916667	0.010449	103.110766	0.01100784	85.47861982
49	74.404762	0.043652	183.008983	0.0459031	165.7082378
50	75.892857	0.009883	44.043408	0.01037451	27.06219672
51	77.380952	0.039311	125.747881	0.04120027	109.0749435
52	78.869048	0.009531	-14.803099	0.00997391	-31.17845329
53	80.357143	0.035798	69.224891	0.03740605	53.1369587
54	81.845238	0.009809	-69.762398	0.01023506	-85.57257119
55	83.333333	0.032654	12.369652	0.0340286	-3.17195706
56	84.821429	0.009772	234.113271	0.01017083	-141.1685325
57	86.309524	0.029599	-43.896966	0.03077051	-58.92730894
58	87.797619	0.009854	181.223195	0.0102322	166.4363516
59	89.285714	0.026626	260.855893	0.02761802	-113.6950459
60	90.773810	0.009161	129.742358	0.00949302	115.4200686
61	92.261905	0.023984	207.864282	0.02482792	-166.2362884
62	93.750000	0.009208	81.669651	0.00952276	67.78417291
63	95.238095	0.021954	153.780328	0.02268462	140.1036014
64	96.726191	0.009290	28.127667	0.00959135	14.65362329
65	98.214286	0.019928	100.044143	0.02055738	86.76696869
66	99.702381	0.008327	-22.890325	0.00858323	-35.97620133
67	101.190476	0.018121	46.635836	0.01866405	33.73591567
68	102.678571	0.007793	-73.187602	0.00802098	-85.90669089
69	104.166667	0.016457	-7.906200	0.01692732	-20.44937671
70	107.142857	0.014608	-63.033768	0.01500559	-75.23911057
71	110.119048	0.013015	241.701919	0.01335309	-130.1830557
72	113.095238	0.011083	186.898055	0.01135819	175.3172852
73	116.071429	0.009275	134.212213	0.00949552	122.9206604
74	119.047619	0.007982	81.029821	0.00816405	70.01356687
75	122.023810	0.007174	24.859172	0.00733179	14.10526544

Tabla 74: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente del cable piezoeléctrico del banco de ensayos con amplificación mecánica amplificada por 10.

Armónico	Frecuencia	Módulo medido	fase medida (°)	Módulo real	Fase real(°)
1	2.9762	0.7223	109.1371	5.6934	26.4549
2	4.4643	0.1214	-80.5600	0.6443	-159.6567
3	5.9524	1.0247	67.3473	4.1357	-8.2483
4	7.4405	0.1894	226.5388	0.6222	154.3379
5	8.9286	1.5342	0.8423	4.2846	-68.0882
6	10.4167	0.2519	170.9284	0.6169	105.1308
7	11.9048	1.9201	-56.1514	4.2190	-118.9628
8	13.3929	0.3160	120.5311	0.6341	60.5541
9	14.8810	2.2301	244.2879	4.1441	-173.0077
10	16.3690	0.3508	65.6640	0.6106	10.8978
11	17.8571	2.4134	187.2229	3.9700	134.8378
12	19.3452	0.3881	12.2946	0.6080	-37.8528
13	20.8333	2.5475	130.1289	3.8258	82.0824
14	22.3214	0.4193	-43.3216	0.6069	-89.3972
15	23.8095	2.5637	72.6063	3.5920	28.3793
16	25.2976	0.4260	266.7002	0.5800	-135.7931
17	26.7857	2.5182	15.4895	3.3432	-25.3775
18	28.2738	0.4296	212.8831	0.5577	173.5423
19	29.7619	2.4444	-40.4535	3.1105	-78.3614
20	31.2500	0.4259	161.7525	0.5324	125.1912
21	32.7381	2.3234	262.4918	2.8580	-132.8032
22	34.2262	0.4104	108.4192	0.4976	74.3162
23	35.7143	2.1575	206.1555	2.5823	173.1753
24	37.2024	0.3953	55.7685	0.4676	23.8473
25	38.6905	1.9733	150.4469	2.3094	119.5253
26	40.1786	0.3649	2.8558	0.4229	-27.1212
27	41.6667	1.8139	94.7686	2.0839	65.6852
28	43.1548	0.3408	-49.4829	0.3884	-77.7202
29	44.6429	1.6437	38.4770	1.8595	11.0417
30	46.1310	0.3079	256.6610	0.3459	-130.0134
31	47.6190	1.4525	-18.3887	1.6219	-44.3403
32	49.1071	0.2730	203.8401	0.3031	178.5756
33	50.5952	1.2671	-74.9353	1.3993	-99.5459
34	52.0833	0.2454	149.4852	0.2697	125.4975
35	53.5714	1.1119	229.2352	1.2164	-154.1586
36	55.0595	0.2070	96.5094	0.2254	73.6823
37	56.5476	0.9760	172.4172	1.0590	150.1313
38	58.0357	0.1823	40.9296	0.1971	19.1611
39	59.5238	0.8430	114.7601	0.9082	93.4867
40	61.0119	0.1579	-16.4473	0.1696	-37.2468
41	62.5000	0.7309	57.1491	0.7826	36.8039
42	63.9881	0.1381	-73.3176	0.1475	-93.2273

43	65.4762	0.6440	-1.0368	0.6859	-20.5284
44	66.9643	0.1248	226.0947	0.1326	-152.9955
45	68.4524	0.5724	-60.1754	0.6068	-78.8797
46	69.9405	0.1062	165.4770	0.1123	147.1438
47	71.4286	0.4987	240.8037	0.5264	-137.1724
48	72.9167	0.1045	103.1108	0.1100	85.4786
49	74.4048	0.4364	183.0090	0.4589	165.7082
50	75.8929	0.0988	44.0434	0.1037	27.0622
51	77.3810	0.3930	125.7479	0.4119	109.0749
52	78.8690	0.0953	-14.8031	0.0997	-31.1785
53	80.3571	0.3579	69.2249	0.3739	53.1370
54	81.8452	0.0981	-69.7624	0.1023	-85.5726
55	83.3333	0.3264	12.3697	0.3402	-3.1720
56	84.8214	0.0977	234.1133	0.1017	-141.1685
57	86.3095	0.2959	-43.8970	0.3076	-58.9273
58	87.7976	0.0985	181.2232	0.1023	166.4364
59	89.2857	0.2662	260.8559	0.2761	-113.6950
60	90.7738	0.0916	129.7424	0.0949	115.4201
61	92.2619	0.2398	207.8643	0.2482	-166.2363
62	93.7500	0.0920	81.6697	0.0952	67.7842
63	95.2381	0.2195	153.7803	0.2268	140.1036
64	96.7262	0.0929	28.1277	0.0959	14.6536
65	98.2143	0.1992	100.0441	0.2055	86.7670
66	99.7024	0.0832	-22.8903	0.0858	-35.9762
67	101.1905	0.1811	46.6358	0.1866	33.7359
68	102.6786	0.0779	-73.1876	0.0802	-85.9067
69	104.1667	0.1645	-7.9062	0.1692	-20.4494
70	107.1429	0.1460	-63.0338	0.1500	-75.2391
71	110.1190	0.1301	241.7019	0.1335	-130.1831
72	113.0952	0.1108	186.8981	0.1135	175.3173
73	116.0714	0.0927	134.2122	0.0949	122.9207
74	119.0476	0.0798	81.0298	0.0816	70.0136
75	122.0238	0.0717	24.8592	0.0733	14.1053

Tabla 75: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente del cable piezoeléctrico del banco de ensayos con amplificación mecánica distancia de seguridad 120km/h.

Armónico	Frecuencia	Módulo medido	fase medida (°)	Módulo real	Fase real(°)
1	1.766784	0.005549	77.071343	0.07328491	-8.56915703
2	1.892983	0.005841	75.257569	0.07203387	-10.07287011
3	2.019182	0.006145	72.850079	0.07107793	-12.17057237
4	2.145381	0.006447	69.911912	0.07022148	-14.799243
5	2.271580	0.006736	66.520496	0.06932604	-17.88147259
6	2.397779	0.007001	62.756798	0.06829858	-21.33631093
7	2.523978	0.007234	58.699360	0.06708161	-25.08523227
8	2.650177	0.007428	54.421655	0.06564518	-29.05478369
9	2.776376	0.007580	49.991378	0.06398062	-33.17728411
10	2.902574	0.007686	45.470748	0.06209574	-37.39053435
11	3.028773	0.007746	40.917166	0.0600111	-41.63714842
12	3.154972	0.007760	36.383893	0.05775707	-45.8638828
13	3.281171	0.007731	31.920473	0.05537142	-50.02121035
14	3.407370	0.007664	27.572729	0.05289729	-54.06332408
15	3.533569	0.007564	23.382169	0.05038129	-57.94873191
16	3.659768	0.007437	19.384660	0.04787175	-61.64158433
17	3.785967	0.007293	15.608273	0.04541674	-65.11382506
18	3.912166	0.007139	12.070346	0.04306207	-68.34813193
19	4.038364	0.006984	8.774018	0.04084897	-71.34138285
20	4.164563	0.006837	5.704838	0.03881169	-74.10804363
21	4.290762	0.006704	2.828423	0.03697501	-76.68251182
22	4.416961	0.006592	0.090315	0.03535218	-79.11926055
23	4.543160	0.006504	-2.581039	0.03394354	-81.48985931
24	4.669359	0.006440	-5.268052	0.03273642	-83.876734
25	4.795558	0.006399	-8.055479	0.03170631	-86.36465579
26	4.921757	0.006377	-11.021551	0.03081948	-89.03186866
27	5.047956	0.006367	-14.230813	0.0300364	-91.94293198
28	5.174154	0.006362	-17.730067	0.0293154	-95.14466133
29	5.300353	0.006354	-21.547670	0.02861608	-98.66542872
30	5.426552	0.006336	-25.695509	0.02790194	-102.5171338
31	5.552751	0.006299	-30.172527	0.02714217	-106.6987324
32	5.678950	0.006237	-34.968766	0.02631265	-111.2002805
33	5.805149	0.006146	-40.069228	0.02539621	-116.0067922
34	5.931348	0.006021	-45.457216	0.02438248	-121.1015837
35	6.057547	0.005860	-51.117132	0.02326739	-126.4690695
36	6.183746	0.005663	-57.036877	0.02205249	-132.0971619
37	6.309944	0.005428	-63.210113	0.02074426	-137.9795358
38	9.464917	0.005377	31.927184	0.0142789	-35.85767726
39	9.591116	0.005803	26.876181	0.0152358	-40.64179452
40	9.717314	0.006235	21.888205	0.01618999	-45.36391031
41	9.843513	0.006673	16.933378	0.01713646	-50.05390726
42	9.969712	0.007112	11.992190	0.01806939	-54.73130206

43	10.095911	0.007551	7.053250	0.01898252	-59.40748875
44	10.222110	0.007987	2.111419	0.01986948	-64.08761227
45	10.348309	0.008416	-2.833773	0.02072419	-68.77214606
46	10.474508	0.008836	-7.779449	0.02154113	-73.45821958
47	10.600707	0.009245	-12.720505	0.02231565	-78.14073161
48	10.726906	0.009641	-17.650535	0.02304413	-82.81328149
49	10.853104	0.010021	-22.562616	0.02372417	-87.46894759
50	10.979303	0.010385	-27.449950	0.02435464	-92.10093837
51	11.105502	0.010733	-32.306418	0.02493565	-96.70313573
52	11.231701	0.011063	-37.127019	0.02546852	-101.2705436
53	11.357900	0.011377	-41.908236	0.02595558	-105.7996472
54	11.484099	0.011675	-46.648302	0.02640002	-110.2886822
55	11.610298	0.011959	-51.347372	0.02680561	-114.7378064
56	11.736497	0.012229	-56.007589	0.02717646	-119.1491661
57	11.862696	0.012488	-60.633039	0.02751667	-123.5268481
58	11.988895	0.012736	-65.229580	0.02783006	-127.8767126
59	12.115093	0.012975	-69.804561	0.0281199	-132.2061125
60	12.241292	0.013206	-74.366447	0.02838867	-136.5235119
61	12.367491	0.013429	-78.924353	0.02863793	-140.8380286
62	12.493690	0.013644	-83.487550	0.02886812	-145.1589346
63	12.619889	0.013851	-88.064960	0.02907865	-149.4951534
64	12.746088	0.014048	267.335310	0.02926788	-153.8547934
65	12.872287	0.014235	262.706363	0.02943329	-158.2447508
66	12.998486	0.014408	258.042819	0.0295716	-162.6704083
67	13.124685	0.014567	253.341002	0.02967908	-167.1354422
68	13.250883	0.014709	248.599022	0.02975175	-171.6417417
69	13.377082	0.014831	243.816755	0.02978565	-176.1894313
70	13.503281	0.014931	238.995728	0.02977709	179.2230158
71	13.629480	0.015007	234.138935	0.02972287	174.598593
72	13.755679	0.015058	229.250594	0.02962049	169.9415199
73	13.881878	0.015082	224.335876	0.02946829	165.2569658
74	14.008077	0.015078	219.400596	0.02926554	160.5507483
75	14.134276	0.015046	214.450907	0.02901249	155.8290191
76	14.26047451	0.01498602	209.4929729	0.02871039	151.0979446
77	14.3866734	0.01489854	204.5326563	0.02836141	146.3633873
78	14.51287229	0.01478488	199.575202	0.02796859	141.6305933
79	14.63907118	0.01464661	194.6249373	0.02753566	136.9038911
80	14.76527007	0.01448565	189.6849893	0.02706689	132.1864089
81	14.89146896	0.01430419	184.7570302	0.02656691	127.4798205
82	15.01766784	0.01410455	179.8410604	0.02604051	122.7841276
83	15.14386673	0.01388909	174.9352434	0.0254924	118.0974954
84	15.27006562	0.01366007	170.0358045	0.02492704	113.416151
85	15.39626451	0.0134196	165.137006	0.02434843	108.7343585
86	15.5224634	0.01316947	160.2312056	0.02375999	104.0444775
87	15.64866229	0.01291116	155.3089998	0.02316443	99.33710655

88	15.77486118	0.01264571	150.3594453	0.02256366	94.60130462
89	15.90106007	0.01237377	145.3703432	0.02195886	89.82487498
90	16.02725896	0.0120956	140.3285598	0.02135043	84.99468625
91	16.15345785	0.01181107	135.220354	0.02073815	80.09699989
92	16.27965674	0.01151979	130.0316773	0.02012133	75.11776983
93	16.40585563	0.01122118	124.7484122	0.01949892	70.04288124
94	16.53205452	0.01091456	119.3565216	0.01886978	64.85829969
95	16.65825341	0.01059929	113.8420878	0.01823283	59.55011028
96	16.7844523	0.01027488	108.1912296	0.01758729	54.10443477
97	16.91065119	0.00994112	102.389896	0.01693281	48.50722497
98	17.03685008	0.00959816	96.4235423	0.01626972	42.74393939
99	17.16304897	0.0092466	90.27670708	0.01559906	36.79911958
100	17.28924785	0.00888756	83.93251448	0.01492279	30.6558929
101	17.41544674	0.00852279	77.37214446	0.01424378	24.29544256
102	17.54164563	0.00815464	70.57433311	0.01356593	17.69650799
103	17.66784452	0.00778615	63.51500092	0.01289416	10.83501304
104	17.79404341	0.00742104	56.16716019	0.01223448	3.68397347
105	17.9202423	0.00706375	48.50132922	0.01159391	-3.78608892
106	18.04644119	0.00671943	40.48677634	0.01098056	-11.60590222
107	18.17264008	0.0063939	32.09400976	0.01040349	-19.8049546
108	18.29883897	0.00609363	23.29895725	0.00987263	-28.40731459
109	18.42503786	0.00582554	14.08912298	0.00939853	-37.4254743
110	18.55123675	0.00559682	4.47149322	0.00899193	-46.85244367
111	18.67743564	0.00541448	-5.51903936	0.0086632	-56.65332618
112	18.80363453	0.00528485	-15.81329309	0.00842143	-66.75893628
113	19.30843009	0.00536423	-57.62508283	0.00841388	-107.8261366
114	19.43462898	0.00553285	-67.57513143	0.00864515	-117.5925139
115	19.56082786	0.00575407	-77.1286131	0.0089568	-126.9633065
116	19.68702675	0.00602248	-86.24857485	0.00933955	-135.9015572
117	19.81322564	0.0063324	265.0700864	0.00978388	-144.4021588
118	19.93942453	0.00667826	256.8092389	0.01028058	-152.4832387
119	20.06562342	0.0070548	248.9363335	0.01082103	-160.1773418
120	20.19182231	0.0074571	241.4117285	0.01139729	-167.5241056
121	20.3180212	0.00788059	234.1939869	0.01200208	-174.5649626
122	20.44422009	0.00832102	227.2432939	0.01262868	178.6602766
123	20.57041898	0.00877435	220.5234048	0.01327081	172.1153718
124	20.69661787	0.00923676	214.0025631	0.0139226	165.7685708
125	20.82281676	0.0097046	207.6537459	0.01457852	159.5928552
126	20.94901565	0.01017438	201.4545035	0.01523337	153.5657796
127	21.07521454	0.01064281	195.3865697	0.01588228	147.6690825
128	21.20141343	0.0111068	189.4353607	0.01652075	141.8881844
129	21.32761232	0.01156348	183.5894321	0.01714472	136.2116455
130	21.45381121	0.01201031	177.8399375	0.01775056	130.6306239
131	21.5800101	0.01244502	172.1801117	0.01833519	125.1383588
132	21.70620899	0.01286572	166.6047913	0.01889607	119.7296916

133	21.83240787	0.01327091	161.1099783	0.01943124	114.4006287
134	21.95860676	0.01365946	155.6924489	0.01993934	109.1479508
135	22.08480565	0.01403063	150.3494089	0.02041957	103.9688685
136	22.21100454	0.01438406	145.078197	0.02087168	98.86072484
137	22.33720343	0.01471973	139.8760359	0.02129593	93.82074727
138	22.46340232	0.0150379	134.7398348	0.02169297	88.84584957
139	22.58960121	0.01533907	129.6660444	0.02206378	83.93248699
140	22.7158001	0.01562391	124.6505667	0.02240955	79.07656621
141	22.84199899	0.01589317	119.6887212	0.0227316	74.27341136
142	22.96819788	0.01614759	114.7752664	0.02303122	69.51778541
143	23.09439677	0.01638787	109.9044731	0.02330957	64.80396404
144	23.22059566	0.01661455	105.0702453	0.02356764	60.12585569
145	23.34679455	0.01682798	100.266277	0.02380609	55.47715897
146	23.47299344	0.01702826	95.48623514	0.02402524	50.85154557
147	23.59919233	0.01721525	90.72395481	0.02422502	46.24285512
148	23.72539122	0.0173885	85.97363134	0.02440501	41.64528759
149	23.85159011	0.01754733	81.2299968	0.0245644	37.05357968
150	23.977789	0.01769083	76.48846826	0.02470207	32.46315306
151	24.10398788	0.0178179	71.74525905	0.02481666	27.87022568
152	24.23018677	0.01792732	66.99744727	0.02490668	23.27188024
153	24.35638566	0.01801783	62.24299919	0.02497054	18.66608764
154	24.48258455	0.01808816	57.48074887	0.02500669	14.0516865
155	24.60878344	0.01813714	52.71033721	0.02501372	9.42832232
156	24.73498233	0.01816375	47.93211623	0.02499043	4.79635171
157	24.86118122	0.01816715	43.14702506	0.02493588	0.15671837
158	24.98738011	0.01814676	38.35644478	0.02484948	-4.48919205
159	25.113579	0.01810226	33.56203932	0.02473101	-9.13971108
160	25.23977789	0.01803361	28.76558921	0.02458064	-13.79305363
161	25.36597678	0.01794106	23.96882478	0.02439891	-18.44748483
162	25.49217567	0.01782513	19.17326487	0.02418672	-23.10148133
163	25.61837456	0.01768655	14.38006661	0.02394528	-27.75388149
164	25.74457345	0.01752629	9.58989176	0.02367602	-32.40401902
165	25.87077234	0.01734543	4.80279447	0.02338061	-37.0518353
166	25.99697123	0.01714516	0.01813464	0.02306078	-41.69796595
167	26.12317012	0.0169267	-4.76547931	0.0227183	-46.34379809
168	26.24936901	0.01669125	-9.55021619	0.02235491	-50.99149607
169	26.3755679	0.01643993	-14.33901523	0.02197223	-55.64399468
170	26.50176678	0.01617376	-19.1355479	0.02157171	-60.30496097
171	26.62796567	0.01589361	-23.94415163	0.02115458	-64.97872797
172	26.75416456	0.01560017	-28.76974085	0.02072185	-69.67020571
173	26.88036345	0.01529398	-33.61770309	0.02027429	-74.38477734
174	27.00656234	0.01497538	-38.49378931	0.01981246	-79.12818947
175	27.13276123	0.01464461	-43.40400928	0.01933668	-83.9064475
176	27.25896012	0.01430177	-48.35454266	0.01884716	-88.72572679
177	27.38515901	0.0139469	-53.35167675	0.01834401	-93.59231031

178	27.5113579	0.01358	-58.40178052	0.0178273	-98.51256273
179	27.63755679	0.01320113	-63.51132344	0.01729713	-103.4929492
180	27.76375568	0.01281041	-68.68694608	0.01675372	-108.5401062
181	27.88995457	0.01240809	-73.93558807	0.01619744	-113.6609689
182	28.01615346	0.0119946	-79.26467777	0.0156289	-118.8629615
183	28.14235235	0.01157056	-84.68238749	0.01504896	-124.1542522
184	28.26855124	0.01113685	269.802042	0.01445877	-129.5440775
185	28.39475013	0.0106946	264.1779039	0.01385983	-135.0431399
186	28.52094902	0.0102452	258.4325512	0.01325397	-140.6640825
187	28.64714791	0.00979034	252.5508418	0.01264337	-146.4220432
188	28.77334679	0.00933201	246.5145027	0.01203058	-152.3352908
189	28.89954568	0.00887248	240.3014183	0.01141855	-158.4259368
190	29.02574457	0.00841438	233.8848629	0.01081059	-164.720703
191	29.15194346	0.00796069	227.2327238	0.01021048	-171.2516978
192	29.27814235	0.00751478	220.3068149	0.00962249	-178.0571034
193	29.40434124	0.00708052	213.0624671	0.00905146	174.8184151
194	29.53054013	0.00666234	205.4487315	0.00850294	167.323913
195	29.65673902	0.00626532	197.4097495	0.00798328	159.4035353
196	29.78293791	0.00589534	188.8881267	0.00749981	150.9998918
197	29.9091368	0.00555913	179.8314058	0.00706085	142.0605291
198	31.17112569	0.00540813	72.28565584	0.00676607	35.65505172
199	31.29732458	0.00572116	62.89274409	0.00714743	26.37291987
200	31.42352347	0.00606932	54.04811944	0.00757162	17.63849963
201	31.54972236	0.00644511	45.70790107	0.00802911	9.40791383
202	31.67592125	0.00684189	37.81889	0.00851152	1.62796714
203	31.80212014	0.00725391	30.32674646	0.00901162	-5.75567658
204	31.92831903	0.00767625	23.18055106	0.00952324	-12.79393315
205	32.05451792	0.00810468	16.33489072	0.01004111	-19.53221203
206	32.18071681	0.00853562	9.75044466	0.0105608	-26.00983047
207	32.3069157	0.00896606	3.39375353	0.01107858	-32.26024429
208	32.43311459	0.00939345	-2.76339983	0.01159135	-38.3116671
209	32.55931348	0.00981571	-8.74475023	0.01209656	-44.18783025
210	32.68551237	0.01023113	-14.57031712	0.01259217	-49.90874969
211	32.81171126	0.01063837	-20.25711239	0.01307655	-55.49143388
212	32.93791015	0.01103638	-25.81976025	0.01354851	-60.95050359
213	33.06410904	0.01142441	-31.27102025	0.01400716	-66.29871496
214	33.19030793	0.0118019	-36.62221454	0.01445189	-71.54738676
215	33.31650681	0.01216851	-41.88356495	0.01488234	-76.70673743
216	33.4427057	0.01252401	-47.06444768	0.0152983	-81.78613984
217	33.56890459	0.01286827	-52.17357451	0.01569967	-86.79430245
218	33.69510348	0.01320118	-57.21910971	0.01608638	-91.73938621
219	33.82130237	0.01352264	-62.20873264	0.01645838	-96.62906722
220	33.94750126	0.01383252	-67.14965648	0.01681556	-101.4705554
221	34.07370015	0.01413058	-72.04861363	0.0171577	-106.2705798
222	34.19989904	0.01441653	-76.91181876	0.01748451	-111.035352

223	34.32609793	0.01468994	-81.74491981	0.01779551	-115.7705168
224	34.45229682	0.01495028	-86.55294688	0.01809014	-120.4811009
225	34.57849571	0.01519691	268.6597329	0.01836769	-125.1714684
226	34.7046946	0.01542911	263.889447	0.01862734	-129.8452886
227	34.83089349	0.0156461	259.133232	0.01886823	-134.5055221
228	34.95709238	0.01584707	254.3888253	0.01908945	-139.1544279
229	35.08329127	0.01603121	249.6546369	0.01929008	-143.7935935
230	35.20949016	0.01619776	244.9296968	0.01946929	-148.4239854
231	35.33568905	0.01634603	240.2135848	0.01962632	-153.0460208
232	35.46188794	0.01647544	235.5063422	0.01976054	-157.6596556
233	35.58808682	0.01658554	230.8083705	0.01987151	-162.2644851
234	35.71428571	0.01667604	226.1203217	0.01995895	-166.8598545
235	35.8404846	0.01674683	221.4429836	0.02002279	-171.444973
236	35.96668349	0.01679794	216.7771657	0.02006315	-176.019028
237	36.09288238	0.01682958	212.1235904	0.02008035	179.4187056
238	36.21908127	0.01684211	207.482792	0.02007488	174.8687651
239	36.34528016	0.01683601	202.855031	0.02004739	170.331414
240	36.47147905	0.01681185	198.2402242	0.01999863	165.8065718
241	36.59767794	0.01677028	193.6378963	0.01992941	161.293766
242	36.72387683	0.01671195	189.047153	0.01984058	156.7921053
243	36.85007572	0.01663753	184.4666801	0.01973298	152.3002781
244	36.97627461	0.01654762	179.8947653	0.01960739	147.8165751
245	37.1024735	0.01644278	175.3293439	0.01946449	143.3389343
246	37.22867239	0.01632344	170.7680654	0.01930485	138.8650078
247	37.35487128	0.01618993	166.2083752	0.01912892	134.3922438
248	37.48107017	0.01604248	161.6476084	0.01893699	129.9179802
249	37.60726906	0.01588118	157.0830885	0.01872921	125.439543
250	37.73346795	0.01570602	152.5122239	0.0185056	120.9543436
251	37.85966683	0.0155169	147.932597	0.0182661	116.4599667
252	37.98586572	0.01531368	143.3420388	0.01801056	111.9542461
253	38.11206461	0.01509615	138.7386843	0.0177388	107.4353194
254	38.2382635	0.01486414	134.1210052	0.01745064	102.901661
255	38.36446239	0.0146175	129.487817	0.01714593	98.35208874
256	38.49066128	0.01435615	124.8382589	0.01682463	93.7857446
257	38.61686017	0.01408009	120.1717483	0.01648677	89.2020484
258	38.74305906	0.01378945	115.4879089	0.01613254	84.60062647
259	38.86925795	0.0134845	110.7864766	0.01576229	79.98121712
260	38.99545684	0.01316562	106.0671841	0.01537651	75.34355558
261	39.12165573	0.01283337	101.3296284	0.01497585	70.68724138
262	39.24785462	0.0124884	96.57312398	0.01456113	66.01159131
263	39.37405351	0.0121315	91.79654386	0.01413329	61.31548097
264	39.5002524	0.01176354	86.99815273	0.01369336	56.59717742
265	39.62645129	0.01138548	82.1754327	0.01324249	51.85416518
266	39.75265018	0.01099831	77.32490358	0.01278183	47.08296646
267	39.87884907	0.01060303	72.44193702	0.01231257	42.27895526

268	40.00504796	0.01020064	67.52056208	0.01183587	37.43616302
269	40.13124685	0.0097921	62.5532567	0.01135288	32.54706999
270	40.25744573	0.00937833	57.53071563	0.01086465	27.60237327
271	40.38364462	0.0089602	52.4415798	0.01037218	22.59071607
272	40.50984351	0.0085385	47.27210481	0.00987641	17.49835631
273	40.6360424	0.00811401	42.00573696	0.00937822	12.30874254
274	40.76224129	0.00768747	36.62255262	0.00887848	7.00195339
275	40.88844018	0.00725965	31.09850083	0.00837807	1.55394015
276	41.01463907	0.00683142	25.40436882	0.00787797	-4.06450773
277	41.14083796	0.00640374	19.50436423	0.0073793	-9.88918039
278	41.26703685	0.00597785	13.35417972	0.00688346	-15.96438299
279	41.39323574	0.00555532	6.89837993	0.00639224	-22.3455487
280	44.04341242	0.00558328	149.0706878	0.00633431	121.3174234
281	44.16961131	0.00595777	142.9148836	0.00675498	115.229122
282	44.2958102	0.00633094	137.0144234	0.00717369	109.3958627
283	44.42200909	0.00670155	131.3225666	0.007589	103.7709068
284	44.54820798	0.00706854	125.801728	0.00799974	98.3166711
285	44.67440687	0.00743097	120.4214666	0.00840485	93.00271624
286	44.80060575	0.00778794	115.1570037	0.00880335	87.80426541
287	44.92680464	0.00813859	109.9881298	0.00919427	82.70111081
288	45.05300353	0.00848201	104.89839	0.0095766	77.67679932
289	45.17920242	0.00881729	99.87446548	0.00994934	72.71801388
290	45.30540131	0.00914348	94.90569021	0.01031142	67.81409027
291	45.4316002	0.00945961	89.98365958	0.01066179	62.95662556
292	45.55779909	0.00976472	85.10190008	0.0109994	58.13914799
293	45.68399798	0.01005788	80.25557989	0.0113232	53.35682742
294	45.81019687	0.01033822	75.44124643	0.01163225	48.60621299
295	45.93639576	0.01060494	70.65658287	0.01192568	43.88498953
296	46.06259465	0.01085735	65.90017865	0.01220275	39.19174818
297	46.18879354	0.01109489	61.17131225	0.01246285	34.52576906
298	46.31499243	0.01131716	56.46974584	0.01270557	29.88681601
299	46.44119132	0.01152392	51.79553303	0.01293066	25.27494426
300	46.56739021	0.01171507	47.14884178	0.01313805	20.69032339
301	46.6935891	0.0118907	42.52979515	0.01332786	16.1330781
302	46.81978799	0.01205101	37.93833328	0.01350036	11.60315011
303	46.94598688	0.01219635	33.3740998	0.01365596	7.10018465
304	47.07218576	0.01232716	28.83635615	0.01379518	2.62344474
305	47.19838465	0.01244393	24.32392674	0.0139186	-1.82824365
306	47.32458354	0.0125472	19.83517701	0.01402684	-6.2565135
307	47.45078243	0.01263748	15.36802535	0.01412051	-10.66344489
308	47.57698132	0.01271526	10.91998813	0.01420017	-15.05151992
309	47.70318021	0.01278094	6.48825529	0.01426629	-19.42354711
310	47.8293791	0.01283483	2.06979211	0.01431922	-23.78255968
311	47.95557799	0.0128771	-2.33853933	0.0143592	-28.13169404
312	48.08177688	0.01290781	-6.73984662	0.0143863	-32.47405628

313	48.20797577	0.01292688	-11.13707016	0.01440045	-36.81258532
314	48.33417466	0.01293412	-15.53285193	0.01440147	-41.14992168
315	48.46037355	0.01292925	-19.92941838	0.01438904	-45.48829034
316	48.58657244	0.01291188	-24.32848468	0.01436278	-49.82940501
317	48.71277133	0.01288162	-28.73118609	0.01432224	-54.17439953
318	48.83897022	0.01283805	-33.13804032	0.01426699	-58.52379018
319	48.96516911	0.01278077	-37.54894251	0.01419662	-62.87747066
320	49.091368	0.01270949	-41.96319283	0.0141108	-67.23473973
321	49.21756689	0.01262397	-46.37955486	0.01400932	-71.59435958
322	49.34376577	0.01252414	-50.79634177	0.01389208	-75.95464199
323	49.46996466	0.01241004	-55.21152604	0.01375918	-80.31355805
324	49.59616355	0.0122819	-59.62286801	0.01361089	-84.66886675
325	49.72236244	0.0121401	-64.02805768	0.01344763	-89.01825669
326	49.84856133	0.01198517	-68.42486392	0.01327001	-93.35949543
327	49.97476022	0.01181777	-72.81128481	0.01307881	-97.69057967
328	50.10095911	0.01163871	-77.18569229	0.0128749	-102.0098801
329	50.227158	0.01144884	-81.54696424	0.01265926	-106.3162731
330	50.35335689	0.01124909	-85.89459658	0.01243293	-110.6092534
331	50.47955578	0.01104037	269.7712114	0.01219692	-114.8890191
332	50.60575467	0.01082359	265.4495052	0.01195224	-119.1565232
333	50.73195356	0.01059955	261.1385618	0.0116998	-123.4134874
334	50.85815245	0.01036898	256.835919	0.01144039	-127.6623728
335	50.98435134	0.01013245	252.5384474	0.01117467	-131.9063076
336	51.11055023	0.00989039	248.2424636	0.0109031	-136.1489736
337	51.23674912	0.00964307	243.9438801	0.010626	-140.3944574
338	51.36294801	0.00939061	239.6383818	0.01034349	-144.6470726
339	51.4891469	0.00913296	235.3216195	0.01005554	-148.9111672
340	51.61534578	0.00886997	230.989408	0.00976196	-153.1909255
341	51.74154467	0.00860138	226.6379133	0.00946249	-157.4901798
342	51.86774356	0.00832689	222.2638198	0.00915679	-161.8122448
343	51.99394245	0.00804616	217.8644626	0.00884451	-166.1597841
344	52.12014134	0.00775889	213.4379196	0.00852533	-170.5347187
345	52.24634023	0.00746487	208.9830547	0.00819899	-174.9381833
346	52.37253912	0.00716394	204.4995099	0.00786535	-179.3705349
347	52.49873801	0.0068561	199.9876439	0.00752441	176.1685863
348	52.6249369	0.0065415	195.4484158	0.00717634	171.6801407
349	52.75113579	0.00622045	190.8832138	0.00682148	167.1655176
350	52.87733468	0.00589341	186.2936237	0.00646035	162.6263041
351	53.00353357	0.005561	181.6811323	0.00609363	158.0639878
352	57.54669359	0.00546628	215.3163175	0.00591649	-166.6196229
353	57.67289248	0.00567369	210.8211265	0.0061391	-171.0713556
354	57.79909137	0.00587146	206.3610583	0.00635117	-175.4881289
355	57.92529026	0.00605985	201.9360581	0.00655298	-179.8699969
356	58.05148915	0.0062392	197.5453267	0.0067449	175.7822423
357	58.17768804	0.00640995	193.1872512	0.00692743	171.4669765

358	58.30388693	0.00657255	188.8593981	0.00710104	167.1817731
359	58.43008582	0.00672745	184.5585686	0.00726626	162.9234342
360	58.5562847	0.00687509	180.2809104	0.00742355	158.6881082
361	58.68248359	0.00701581	176.0220767	0.00757329	154.4714494
362	58.80868248	0.00714987	171.7774245	0.00771578	150.2688154
363	58.93488137	0.00727742	167.5422355	0.00785116	146.0754887
364	59.06108026	0.00739845	163.3119453	0.00797946	141.886906
365	59.18727915	0.00751286	159.0823655	0.00810054	137.6988794
366	59.31347804	0.00762039	154.8498817	0.00821416	133.5077955
367	59.43967693	0.00772069	150.6116166	0.00831994	129.3107777
368	59.56587582	0.00781331	146.3655478	0.0084174	125.1058044
369	59.69207471	0.00789777	142.1105752	0.00850603	120.8917765
370	59.8182736	0.00797354	137.8465374	0.00858526	116.668533
371	59.94447249	0.00804012	133.5741766	0.00865457	112.4368173
372	60.07067138	0.00809704	129.2950608	0.00871346	108.198198
373	60.19687027	0.00814392	125.0114656	0.00876153	103.9549513
374	60.32306916	0.00818047	120.7262264	0.00879848	99.70991361
375	60.44926805	0.00820654	116.4425679	0.00882416	95.46631031
376	60.57546694	0.00822211	112.1639195	0.00883853	91.22757166
377	60.70166583	0.00822728	107.8937249	0.00884175	86.99714192
378	60.82786471	0.00822232	103.6352531	0.00883409	82.77829091
379	60.9540636	0.0082076	99.39142006	0.00881596	78.5739354
380	61.08026249	0.0081836	95.16462819	0.00878789	74.38647849
381	61.20646138	0.00815089	90.95663135	0.00875049	70.21767479
382	61.33266027	0.00811009	86.76843335	0.00870445	66.06852882
383	61.45885916	0.00806183	82.60022661	0.00865043	61.93923373
384	61.58505805	0.00800673	78.45137649	0.00858912	57.82915562
385	61.71125694	0.00794536	74.32045493	0.00852113	53.73686711
386	61.83745583	0.00787823	70.20532388	0.008447	49.66023089
387	61.96365472	0.00780572	66.10326611	0.00836717	45.59653043
388	62.08985361	0.00772813	62.01115709	0.00828192	41.54264189
389	62.2160525	0.00764559	57.92566802	0.00819144	37.49523718
390	62.34225139	0.00755815	53.84348777	0.00809576	33.45100585
391	62.46845028	0.00746571	49.76154905	0.00799479	29.4068813
392	62.59464917	0.0073681	45.67724434	0.00788834	25.36025671
393	62.72084806	0.00726506	41.58861775	0.00777613	21.30917686
394	62.84704695	0.00715628	37.49452121	0.00765786	17.25249434
395	62.97324584	0.00704147	33.39472671	0.00753319	13.18998184
396	63.09944472	0.00692032	29.28998965	0.00740182	9.12239539
397	63.22564361	0.00679259	25.18206178	0.00726348	5.05148744
398	63.3518425	0.00665813	21.07365542	0.00711802	0.97997093
399	63.47804139	0.00651688	16.96836268	0.00696538	-3.08856135
400	63.60424028	0.00636889	12.87053552	0.00680562	-7.14975679
401	63.73043917	0.00621435	8.78513305	0.00663895	-11.19865565
402	63.85663806	0.00605358	4.71754354	0.0064657	-15.229869

403	63.98283695	0.005887	0.67338893	0.00628633	-19.23777428
404	64.10903584	0.00571515	-3.34167964	0.00610144	-23.21671972
405	64.23523473	0.00553866	-7.32218578	0.00591167	-27.16122828
406	64.36143362	0.0053582	-11.26302036	0.00571777	-31.06619021

Tabla 76: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente del cable piezoeléctrico del banco de ensayos sin amplificación mecánica

Armónico	Frecuencia	Módulo medido	fase medida (°)	Módulo real	Fase real(°)
1	2.7322404	0.03915726	-27.41676019	0.33577992	-110.693016
2	4.0983607	0.00407037	-86.12927402	0.02346791	-166.1007836
3	5.4644809	0.01256961	141.797874	0.05499024	65.06511247
4	6.8306011	0.00535543	9.86971808	0.019019	-63.70830262
5	8.1967213	0.0564596	268.9301855	0.17000243	-161.5921729
6	9.5628415	0.00716816	192.7506533	0.01886801	125.1729723
7	10.9289617	0.04947026	72.90713386	0.11644814	8.15441566
8	12.295082	0.00717043	-19.77352265	0.01536133	-81.82671331
9	13.6612022	0.06010813	224.3460742	0.11884143	164.8639691
10	15.0273224	0.00914624	134.8305835	0.01687859	77.79045742
11	16.3934426	0.06608624	22.21805675	0.11489527	-32.50792292
12	17.7595628	0.00847345	-65.72761408	0.01398657	-118.264469
13	19.1256831	0.06759367	177.0532566	0.10662088	126.5844814
14	20.4918033	0.00794717	99.94097796	0.01204555	51.42404948
15	21.8579235	0.06681465	-25.74914312	0.09776939	-72.42508976
16	23.2240437	0.00839112	251.1299556	0.01190187	-153.8101805
17	24.5901639	0.06490932	130.0478527	0.08955114	86.74419244
18	25.9562842	0.00668136	56.89450321	0.00899288	15.13382211
19	27.3224044	0.05978471	-74.2701796	0.07870879	-114.5756441
20	28.6885246	0.00391551	221.7067078	0.00505365	-177.225747
21	30.0546448	0.05271496	82.67533554	0.06683375	45.03900771
22	31.420765	0.00407261	27.78749388	0.00508084	-8.62452867
23	32.7868852	0.0442524	241.1986444	0.05440823	-154.0561158
24	34.1530055	0.00279928	207.5920004	0.00339646	173.4319491
25	35.5191257	0.0360724	39.93444089	0.04324418	6.81074543
26	36.8852459	0.00289779	26.12005275	0.003436	-6.0217221
27	38.2513661	0.02794993	203.5040882	0.03281045	172.2934442
28	40.9836066	0.02212435	9.64128851	0.02551841	-19.84616612
29	42.3497268	0.00313728	33.87688951	0.00359063	5.18754323
30	43.715847	0.01651934	178.8350405	0.01877195	150.9051427
31	45.0819672	0.00315253	205.7324424	0.00355888	178.5258272
32	46.4480874	0.01287284	-7.94486151	0.01444381	-34.4620515
33	47.8142077	0.0044021	18.60159779	0.00491152	-7.25788761
34	49.1803279	0.00952288	171.150428	0.01056937	145.9189045
35	50.5464481	0.0044351	190.2627665	0.00489857	165.631294
36	51.9125683	0.00922366	0.52129197	0.01014149	-23.53634329
37	53.2786885	0.0045297	-4.50128451	0.00495945	-28.00972318
38	54.6448087	0.01122564	179.3910541	0.01224228	156.4086304
39	56.010929	0.00494921	164.744139	0.00537757	142.2659028
40	57.3770492	0.01183167	-12.2371862	0.01281142	-34.23180491
41	58.7431694	0.00570191	-34.18876633	0.00615413	-55.7191687
42	60.1092896	0.01285506	155.7109733	0.01383256	134.6264732

43	61.4754098	0.00558887	130.2335642	0.00599672	109.5776641
44	62.8415301	0.01305144	-40.0392435	0.01396635	-60.28290317
45	64.2076503	0.00582271	-63.72021419	0.00621516	-83.56711431
46	65.5737705	0.01265556	123.9975677	0.01347641	104.5327663
47	66.9398907	0.00572636	100.3482833	0.00608408	81.25168534
48	68.3060109	0.01214656	-68.7274838	0.01287797	-87.46905787
49	69.6721311	0.00558619	267.5373641	0.00591068	-110.8616963
50	71.0382514	0.01165755	96.45813378	0.01231129	78.38970334
51	72.4043716	0.00564792	71.56351367	0.00595391	53.8144165
52	73.7704918	0.01117972	262.8034434	0.01176531	-114.6370668
53	75.136612	0.00547296	234.3642606	0.0057503	-142.7778925
54	76.5027322	0.01055111	67.37018827	0.01106873	50.51664741
55	77.8688525	0.00518618	41.86044134	0.00543265	25.28622367
56	79.2349727	0.01004645	230.9418735	0.01050925	-145.3618814
57	80.6010929	0.00546134	207.1746891	0.00570535	-168.8670599
58	81.9672131	0.00910045	32.60923563	0.00949504	16.82141583
59	83.3333333	0.0053296	7.35134765	0.00555399	-8.19026153
60	84.6994536	0.00725736	196.1426265	0.00755423	-179.1601526
61	86.0655738	0.00511541	167.3424886	0.00531882	152.271478
62	87.431694	0.00602237	6.57601312	0.00625527	-8.26998905
63	88.7978142	0.00461826	-32.31783079	0.00479205	-46.94529988
64	90.1639344	0.00539994	177.4935991	0.00559777	163.0784572
65	91.5300546	0.00374937	126.0114316	0.00388316	111.8026662
66	92.8961749	0.00479742	-13.38615259	0.00496424	-27.3942507
67	94.2622951	0.00290661	-68.89659391	0.00300514	-82.70950501
68	95.6284153	0.00418881	159.0750065	0.00432731	145.4520193
69	98.3606557	0.0041683	-26.48661932	0.00429957	-39.74473443
70	101.0928962	0.00423072	141.5082582	0.00435783	128.5963036
71	103.8251366	0.0043418	-55.37469253	0.00446645	-67.95781828
72	106.557377	0.00440071	102.6770507	0.00452161	90.40667183
73	109.2896175	0.00404154	256.1720578	0.00414794	-115.8005218
74	112.0218579	0.00355532	46.3672371	0.00364513	34.67854078
75	114.7540984	0.00292957	188.3914839	0.00300067	176.973695

Tabla 77: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente del cable piezoeléctrico del banco de ensayos sin amplificación mecánica amplificada por 100.

Armónico	Frecuencia	Módulo medido	fase medida (°)	Módulo real	Fase real(°)
1	2.73224044	3.92648664	-27.41676019	33.67026572	-110.6930159
2	4.09836066	0.40815514	-86.12927402	2.35323771	-166.1007837
3	5.46448087	1.26041499	141.797874	5.51413483	65.06511241
4	6.83060109	0.53701471	9.86971808	1.90712688	-63.70830263
5	8.19672131	5.66147524	268.9301855	17.0469601	-161.5921729
6	9.56284153	0.71878608	192.7506533	1.89198617	125.1729724
7	10.92896175	4.96062037	72.90713386	11.67681411	8.15441576
8	12.29508197	0.71901305	-19.77352265	1.5403532	-81.82671337
9	13.66120219	6.02733035	224.3460742	11.91679983	164.863969
10	15.0273224	0.91713698	134.8305835	1.69249683	77.79045742
11	16.39344262	6.62678442	22.21805675	11.52110048	-32.50792288
12	17.75956284	0.84967349	-65.72761408	1.40250028	-118.264469
13	19.12568306	6.77794101	177.0532566	10.69138617	126.5844813
14	20.49180328	0.79690103	99.94097796	1.20786558	51.42404945
15	21.8579235	6.69982538	-25.74914312	9.80380581	-72.42508977
16	23.22404372	0.84141804	251.1299556	1.19345828	-153.8101805
17	24.59016393	6.50876883	130.0478527	8.9797224	86.74419248
18	25.95628415	0.66997234	56.89450321	0.90175931	15.13382206
19	27.32240437	5.99489941	-74.2701796	7.892508	-114.5756441
20	28.68852459	0.39262675	221.7067078	0.50675368	-177.225747
21	30.05464481	5.2859817	82.67533554	6.70174014	45.03900772
22	31.42076503	0.40837999	27.78749388	0.50947959	-8.62452865
23	32.78688525	4.43740065	241.1986444	5.45577413	-154.0561158
24	34.15300546	0.28069739	207.5920004	0.3405796	173.4319491
25	35.51912568	3.6171521	39.93444089	4.33630083	6.81074541
26	36.8852459	0.29057555	26.12005275	0.34454476	-6.0217221
27	38.25136612	2.802673	203.5040882	3.29006073	172.2934442
28	40.98360656	2.21851448	9.64128851	2.55885347	-19.84616615
29	42.34972678	0.31459002	33.87688951	0.36004973	5.18754322
30	43.71584699	1.65647388	178.8350405	1.88235383	150.9051427
31	45.08196721	0.31611935	205.7324424	0.35686623	178.5258272
32	46.44808743	1.29082168	-7.94486151	1.44835082	-34.46205148
33	47.81420765	0.44141949	18.60159779	0.49250106	-7.25788763
34	49.18032787	0.95490494	171.150428	1.05984119	145.9189045
35	50.54644809	0.44472829	190.2627665	0.49120309	165.631294
36	51.91256831	0.92490019	0.52129197	1.01693499	-23.5363433
37	53.27868852	0.4542143	-4.50128451	0.49730697	-28.00972317
38	54.64480874	1.12564879	179.3910541	1.2275919	156.4086304
39	56.01092896	0.49628055	164.744139	0.53923407	142.2659028
40	57.37704918	1.18641801	-12.2371862	1.28466267	-34.23180491
41	58.7431694	0.57175783	-34.18876633	0.61710459	-55.71916869
42	60.10928962	1.28903894	155.7109733	1.38705735	134.6264732

43	61.47540984	0.56042246	130.2335642	0.60131948	109.5776641
44	62.84153005	1.3087304	-40.0392435	1.40047306	-60.28290319
45	64.20765027	0.58387091	-63.72021419	0.62322391	-83.56711432
46	65.57377049	1.26903416	123.9975677	1.35134453	104.5327663
47	66.93989071	0.57421005	100.3482833	0.61008064	81.25168535
48	68.30601093	1.21799407	-68.7274838	1.29133605	-87.46905786
49	69.67213115	0.56015435	267.5373641	0.59269272	-110.8616963
50	71.03825137	1.1689581	96.45813378	1.23451169	78.38970333
51	72.40437158	0.56634357	71.56351367	0.59702707	53.8144165
52	73.7704918	1.12104428	262.8034434	1.17976379	-114.6370668
53	75.13661202	0.54879986	234.3642606	0.57661014	-142.7778925
54	76.50273224	1.05801064	67.37018827	1.10991463	50.51664742
55	77.86885246	0.5200436	41.86044134	0.5447579	25.28622366
56	79.23497268	1.00740573	230.9418735	1.05381242	-145.3618814
57	80.6010929	0.54763429	207.1746891	0.57210215	-168.8670599
58	81.96721311	0.91254577	32.60923563	0.95211362	16.82141583
59	83.33333333	0.53442408	7.35134765	0.55692512	-8.19026152
60	84.69945355	0.72773006	196.1426265	0.75749838	-179.1601526
61	86.06557377	0.51294699	167.3424886	0.53334349	152.271478
62	87.43169399	0.60389171	6.57601312	0.62724601	-8.26998905
63	88.79781421	0.46309459	-32.31783079	0.48052153	-46.94529988
64	90.16393443	0.54147742	177.4935991	0.56131499	163.0784572
65	91.53005464	0.37596691	126.0114316	0.38938285	111.8026662
66	92.89617486	0.48106026	-13.38615259	0.49778796	-27.3942507
67	94.26229508	0.2914599	-68.89659391	0.30134035	-82.70950501
68	95.6284153	0.42003174	159.0750065	0.4339195	145.4520193
69	98.36065574	0.41797574	-26.48661932	0.43113888	-39.74473442
70	101.0928962	0.42423441	141.5082582	0.43698058	128.5963036
71	103.8251366	0.43537313	-55.37469253	0.44787208	-67.95781828
72	106.5573771	0.44128025	102.6770507	0.4534031	90.40667184
73	109.2896175	0.40526492	256.1720578	0.41593379	-115.8005218
74	112.0218579	0.35650867	46.3672371	0.36551445	34.67854078
75	114.7540984	0.29376187	188.3914839	0.30089164	176.973695

Tabla 78: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente del cable piezoeléctrico del banco de ensayos sin amplificación mecánica distancia de seguridad 90km/h.

Armónico	Frecuencia	Módulo medido	fase medida (°)	Módulo real	Fase real(°)
1	0.16818029	0.00282699	84.13698641	0.39113295	-5.44723723
2	0.33636058	0.00288473	77.91590793	0.19957705	-11.25258314
3	0.50454087	0.00297061	71.06675019	0.13703031	-17.68609586
4	0.67272116	0.00307177	63.44930138	0.10629183	-24.88803088
5	0.84090145	0.00317418	55.04210122	0.08788933	-32.87989211
6	1.00908174	0.00326459	45.90415922	0.075349	-41.60271356
7	1.17726202	0.00333162	36.13597384	0.06593342	-50.95604012
8	1.34544231	0.00336632	25.85203589	0.0583157	-60.8254242
9	1.5136226	0.00336237	15.16559657	0.05179845	-71.09765761
10	1.68180289	0.00331601	4.18219805	0.04599872	-81.66724099
11	1.84998318	0.00322593	-7.00163987	0.04070338	-92.43769707
12	2.01816347	0.00309306	-18.29702845	0.03579621	-103.3201794
13	2.18634376	0.00292036	-29.61994887	0.0312181	-114.2307112
14	2.35452405	0.0027125	-40.88766555	0.02694388	-125.0865985
15	2.52270434	0.00247555	-52.01431048	0.02296818	-135.8020146
16	2.69088463	0.00221663	-62.9051494	0.01929614	-146.2822663
17	2.85906492	0.00194355	-73.44836686	0.01593735	-156.4155786
18	3.02724521	0.00166438	-83.50189661	0.01290157	-166.0599254
19	3.1954255	0.00138709	267.1301962	0.01019601	-175.0194117
20	3.36360579	0.00111925	258.7449859	0.00782374	177.0029977
21	3.53178607	0.00086784	251.8464313	0.00578357	170.5112227
22	7.06357215	0.00114019	16.21276863	0.00392649	-56.83677872
23	7.23175244	0.00155023	4.22397915	0.00522508	-68.44589936
24	7.39993273	0.00198377	-8.21134998	0.00654799	-80.50312328
25	7.56811302	0.00243083	-20.96186939	0.007862	-92.87712419
26	7.73629331	0.00288063	-33.95954902	0.00913399	-105.4998944
27	7.9044736	0.00332205	-47.16448984	0.01033222	-118.3315564
28	8.07265388	0.00374404	-60.55176405	0.01142759	-131.3472034
29	8.24083417	0.00413609	-74.1056666	0.01239473	-144.5311503
30	8.40901446	0.00448874	-87.81691569	0.01321295	-157.8741348
31	8.57719475	0.00479387	258.3188139	0.01386692	-171.3718503
32	8.74537504	0.00504513	244.3016946	0.01434717	174.9758577
33	8.91355533	0.00523812	230.1282026	0.01465027	161.1654483
34	9.08173562	0.00537062	215.7914005	0.01477882	147.1899674
35	9.24991591	0.0054426	201.2811683	0.01474113	133.0392794
36	9.4180962	0.00545625	186.5844928	0.01455074	118.7003562
37	9.58627649	0.00541579	171.6859422	0.01422565	104.1577515
38	9.75445678	0.0053273	156.5684812	0.01378747	89.39441642
39	9.92263707	0.00519839	141.2148161	0.01326036	74.39304442
40	10.09081736	0.00503778	125.6094792	0.01266992	59.13815544
41	10.25899765	0.00485489	109.7418251	0.01204192	43.61909257
42	10.42717793	0.00465927	93.60997326	0.01140106	27.83396437

43	10.59535822	0.00446005	77.22542215	0.0107697	11.79425913
44	10.76353851	0.00426535	60.61757493	0.01016662	-4.47062956
45	10.9317188	0.0040817	43.83686085	0.00960595	-20.9102814
46	11.09989909	0.00391364	26.95482249	0.00909644	-37.45316208
47	11.26807938	0.00376337	10.05988432	0.00864111	-54.01085481
48	11.43625967	0.00363071	-6.75125892	0.00823751	-70.48667186
49	11.60443996	0.00351337	-23.3849702	0.00787849	-86.78698267
50	11.77262025	0.00340728	-39.76176927	0.00755346	-102.8323128
51	11.94080054	0.00330725	-55.82426769	0.00724973	-118.5652791
52	12.10898083	0.00320744	-71.54030285	0.0069539	-133.9537236
53	12.27716112	0.00310193	-86.90136153	0.00665289	-148.9891373
54	12.44534141	0.00298504	258.0824122	0.00633472	-163.6816677
55	12.6135217	0.00285159	243.3890439	0.005989	-178.0532924
56	12.78170198	0.00269713	228.9922611	0.00560719	167.8697138
57	12.94988227	0.00251802	214.8694573	0.00518277	154.0647422
58	13.11806256	0.00231153	201.010969	0.00471135	140.522128
59	13.28624285	0.00207597	187.4334663	0.00419073	127.2585402
60	13.45442314	0.00181077	174.2046974	0.00362103	114.3417266
61	13.62260343	0.00151663	161.5001154	0.00300488	101.9471401
62	13.79078372	0.0011959	149.7609721	0.00234798	90.51603318
63	13.95896401	0.00085374	140.2584725	0.0016613	81.31961151
64	14.63168517	0.00081347	228.6543533	0.00152988	170.9202529
65	14.79986546	0.00122253	219.7038731	0.00228054	162.2660868
66	14.96804575	0.00163659	207.6477219	0.00302861	150.5043054
67	15.13622603	0.00204694	194.2456041	0.00375834	137.3946166
68	15.30440632	0.00244798	180.092945	0.00446012	123.53245
69	15.47258661	0.00283556	165.4459743	0.00512723	109.1740394
70	15.6407669	0.00320665	150.4353222	0.00575518	94.45001997
71	15.80894719	0.00355926	135.1380891	0.00634142	79.43749714
72	15.97712748	0.00389235	119.6069005	0.00688514	64.18910164
73	16.14530777	0.00420572	103.8831532	0.00738701	48.74623595
74	16.31348806	0.00449983	88.00349944	0.00784882	33.1455583
75	16.48166835	0.00477561	72.0030006	0.00827312	17.42213631
76	16.64984864	0.00503425	55.91640506	0.00866277	1.61072485
77	16.81802893	0.0052769	39.77825506	0.00902053	-14.25412708
78	16.98620922	0.00550452	23.62224316	0.00934871	-30.13871991
79	17.15438951	0.00571768	7.4801353	0.00964891	-46.01128043
80	17.32256979	0.00591648	-8.6194666	0.00992188	-61.84319926
81	17.49075008	0.0061005	-24.65229021	0.01016748	-77.61019633
82	17.65893037	0.00626884	-40.59931136	0.01038476	-93.29323957
83	17.82711066	0.0064202	-56.44732208	0.01057212	-108.8791129
84	17.99529095	0.00655299	-72.18911783	0.01072754	-124.3606034
85	18.16347124	0.00666548	-87.82333325	0.01084877	-139.7363372
86	18.33165153	0.00675593	256.6460061	0.0109336	-155.0103313
87	18.49983182	0.00682269	241.2101342	0.01098001	-170.1913428

88	18.66801211	0.00686435	225.8563182	0.01098637	174.7079047
89	18.8361924	0.00687978	210.5686932	0.01095154	159.6715551
90	19.00437269	0.00686818	195.3291101	0.01087492	144.6814687
91	19.17255298	0.00682916	180.1179713	0.01075651	129.7180576
92	19.34073327	0.00676269	164.9150381	0.01059693	114.7610925
93	19.50891356	0.00666915	149.7002045	0.01039735	99.79047713
94	19.67709384	0.00654927	134.454238	0.01015947	84.78698883
95	19.84527413	0.00640412	119.1594863	0.00988547	69.73298521
96	20.01345442	0.00623504	103.8005499	0.00957789	54.61307679
97	20.18163471	0.00604359	88.36491329	0.00923956	39.41475828
98	20.349815	0.00583146	72.84352251	0.00887343	24.12898591
99	20.51799529	0.00560042	57.23128652	0.0084825	8.75067894
100	20.68617558	0.00535217	41.52747397	0.00806961	-6.72088359
101	20.85435587	0.00508828	25.73597127	0.00763736	-22.2818048
102	21.02253616	0.0048101	9.86537096	0.00718797	-37.92348164
103	21.19071645	0.00451872	-6.07112697	0.00672319	-53.6327035
104	21.35889674	0.00421487	-22.05598828	0.00624427	-69.39192552
105	21.52707703	0.00389901	-38.06773068	0.00575196	-85.17965471
106	21.69525732	0.00357127	-54.08128449	0.00524659	-100.9708107
107	21.86343761	0.00323161	-70.06806574	0.00472817	-116.7367986
108	22.03161789	0.00287988	-85.99526903	0.00419656	-132.4448023
109	22.19979818	0.00251596	258.1766303	0.00365169	-148.0552863
110	22.36797847	0.00213986	242.5005578	0.00309366	-163.5153142
111	22.53615876	0.00175192	227.0604257	0.00252303	-178.7409628
112	22.70433905	0.00135287	212.0227419	0.00194094	166.4342867
113	22.87251934	0.0009441	197.8275052	0.00134941	152.450444
114	23.71342079	0.0012008	-69.07418746	0.00168575	-113.416985
115	23.88160108	0.00162728	-83.24884757	0.00227664	-127.389257
116	24.04978137	0.00204733	262.1834304	0.0028546	-141.7560537
117	24.21796165	0.00245795	247.448459	0.00341569	-156.2915516
118	24.38614194	0.00285651	232.6315931	0.00395649	-170.9103848
119	24.55432223	0.00324069	217.7675452	0.00447404	174.4221699
120	24.72250252	0.00360856	202.8691478	0.00496597	159.7189559
121	24.89068281	0.00395859	187.9386988	0.00543048	144.982282
122	25.0588631	0.00428966	172.9731959	0.00586635	130.2091567
123	25.22704339	0.00460107	157.9670976	0.00627292	115.3940492
124	25.39522368	0.00489247	142.9139659	0.00665003	100.5305323
125	25.56340397	0.00516386	127.8075502	0.00699795	85.61236603
126	25.73158426	0.00541546	112.6425555	0.00731732	70.63426621
127	25.89976455	0.0056477	97.4152032	0.00760897	55.59246469
128	26.06794484	0.00586113	82.12362432	0.0078739	40.48510319
129	26.23612513	0.00605628	66.7681009	0.00811309	25.3124743
130	26.40430542	0.00623365	51.35115579	0.00832743	10.07711138
131	26.5724857	0.00639357	35.87749344	0.00851758	-5.21627067
132	26.74066599	0.00653618	20.35380002	0.00868395	-20.56097525

133	26.90884628	0.00666136	4.78842177	0.00882658	-35.94864576
134	27.07702657	0.00676871	-10.80904897	0.00894514	-51.36967952
135	27.24520686	0.00685753	-26.42824201	0.00903891	-66.81369609
136	27.41338715	0.00692689	-42.05848947	0.00910686	-82.27001735
137	27.58156744	0.00697563	-57.68927649	0.00914767	-97.72811828
138	27.74974773	0.00700246	-73.31062736	0.00915987	-113.1780131
139	27.91792802	0.00700605	-88.9134017	0.00914192	-128.6105513
140	28.08610831	0.00698512	255.5105133	0.00909238	-144.01761
141	28.2542886	0.00693856	239.9681175	0.00901003	-159.3921797
142	28.42246889	0.0068655	224.4653127	0.00889397	-174.7283484
143	28.59064918	0.00676542	209.007007	0.00874378	169.9788017
144	28.75882947	0.00663823	193.5972936	0.00855953	154.7333736
145	28.92700975	0.00648427	178.2396904	0.00834191	139.5388949
146	29.09519004	0.00630436	162.9374318	0.00809216	124.3986096
147	29.26337033	0.00609978	147.6938044	0.00781213	109.3158138
148	29.43155062	0.00587223	132.512531	0.00750416	94.29424
149	29.59973091	0.00562378	117.3982098	0.00717107	79.33849584
150	29.7679112	0.00535678	102.35683	0.00681597	64.45457981
151	29.93609149	0.00507379	87.39639634	0.00644223	49.65050597
152	30.10427178	0.00477746	72.52771892	0.0060533	34.93709376
153	30.27245207	0.00447046	57.76545706	0.00565262	20.32901168
154	30.44063236	0.00415537	43.12956164	0.00524351	5.84621973
155	30.60881265	0.00383464	28.64735765	0.00482905	-8.48394803
156	30.77699294	0.00351053	14.35667825	0.0044121	-22.62364944
157	30.94517323	0.00318507	0.31077363	0.00399519	-36.51962536
158	31.11335351	0.00286015	-13.4136937	0.00358068	-50.09520443
159	31.2815338	0.00253758	-26.70310542	0.00317077	-63.23675953
160	31.44971409	0.00221932	-39.38301888	0.00276785	-75.76983925
161	31.61789438	0.00190786	-51.17448162	0.00237495	-87.41548248
162	31.78607467	0.00160699	-61.61187057	0.00199674	-97.70805754
163	31.95425496	0.00132348	-69.89049053	0.00164146	-105.8428607
164	32.12243525	0.00107045	-74.63069536	0.00132525	-110.4402374
165	32.29061554	0.00087397	-73.85576275	0.00108008	-109.5234568
166	32.62697612	0.00081577	-58.10110551	0.00100463	-93.48801098
167	32.79515641	0.00097243	-54.46241797	0.0011955	-89.71036637
168	32.9633367	0.00120045	-57.03629328	0.00147333	-92.1462319
169	33.13151699	0.001465	-63.93951873	0.001795	-98.91238676
170	33.29969728	0.00174712	-73.49496652	0.00213712	-108.3316952
171	33.46787756	0.00203652	-84.68561393	0.00248703	-119.3871265
172	33.63605785	0.00232694	263.0718263	0.00283711	-131.4953855
173	33.80423814	0.00261407	250.1192314	0.00318209	-144.3145874
174	33.97241843	0.00289455	236.6652205	0.00351795	-157.636105
175	34.14059872	0.00316559	222.8426599	0.00384135	-171.3270646
176	34.30877901	0.00342477	208.7397687	0.00414945	174.7007608
177	34.4769593	0.00367	194.4175723	0.00443978	160.5084037

178	34.64513959	0.0038995	179.9200939	0.00471031	146.1398952
179	34.81331988	0.0041118	165.2805387	0.00495934	131.6284478
180	34.98150017	0.00430576	150.5251737	0.00518563	117.0003357
181	35.14968046	0.00448059	135.6758269	0.00538832	102.2773944
182	35.31786075	0.0046358	120.7515242	0.00556695	87.47865671
183	35.48604104	0.00477126	105.7695582	0.00572146	72.6214227
184	35.65422133	0.00488709	90.746167	0.0058521	57.72193747
185	35.82240161	0.00498368	75.69692675	0.00595945	42.79578414
186	35.9905819	0.00506161	60.63692732	0.00604431	27.85805959
187	36.15876219	0.00512163	45.58077837	0.00610766	12.92338038
188	36.32694248	0.00516459	30.54248287	0.0061506	-1.99424368
189	36.49512277	0.00519139	15.53521213	0.00617429	-16.88163448
190	36.66330306	0.00520296	0.57101579	0.00617991	-31.72673568
191	36.83148335	0.0052002	-14.33949893	0.00616859	-46.51893338
192	36.99966364	0.00518396	-29.18748355	0.00614142	-61.2493725
193	37.16784393	0.00515504	-43.96612641	0.00609938	-75.91123485
194	37.33602422	0.00511415	-58.67086102	0.00604338	-90.49994744
195	37.50420451	0.00506189	-73.29947794	0.00597417	-105.0132944
196	37.6723848	0.00499879	-87.85212025	0.00589243	-119.4514125
197	37.84056509	0.00492527	257.6688498	0.0057987	-133.8166576
198	38.00874538	0.00484167	243.2591169	0.0056934	-148.1133388
199	38.17692566	0.00474824	228.9128066	0.00557688	-162.3473244
200	38.34510595	0.00464517	214.6229953	0.0054494	-176.5255319
201	38.51328624	0.00453262	200.3823186	0.00531115	169.3446806
202	38.68146653	0.00441069	186.1836579	0.00516231	155.2562003
203	38.84964682	0.00427951	172.0208847	0.00500307	141.2029048
204	39.01782711	0.00413927	157.8896474	0.00483364	127.1804483
205	39.1860074	0.00399018	143.7881932	0.00465434	113.1870839
206	39.35418769	0.00383257	129.7182273	0.00446556	99.22452256
207	39.52236798	0.00366691	115.6858278	0.00426786	85.29884813
208	39.69054827	0.00349379	101.7024488	0.00406196	71.42152058
209	39.85872856	0.00331395	87.78606716	0.00384876	57.61052219
210	40.02690885	0.00312834	73.96254668	0.00362933	43.89172246
211	40.19508914	0.00293804	60.26732676	0.00340498	30.30056629
212	40.36326942	0.00274435	46.74756824	0.00317721	16.88422001
213	40.53144971	0.00254879	33.46491886	0.00294777	3.70433679
214	40.69963	0.0023531	20.49905799	0.00271868	-9.15939861
215	40.86781029	0.00215935	7.95208589	0.00249232	-21.60488061
216	41.03599058	0.00197001	-4.04652812	0.00227153	-33.50263461
217	41.20417087	0.00178809	-15.3356963	0.00205973	-44.69156764
218	41.37235116	0.00161731	-25.72272943	0.00186119	-54.97898528
219	41.54053145	0.00146232	-34.99585094	0.0016812	-64.15310586
220	41.70871174	0.00132877	-42.96439738	0.00152621	-72.02326083
221	41.87689203	0.0012231	-49.54465744	0.0014035	-78.50573383
222	42.04507232	0.00115158	-54.8862895	0.0013202	-83.75017829

223	42.21325261	0.00111857	-59.46382076	0.00128117	-88.23111643
224	42.3814329	0.00112457	-64.00109896	0.00128685	-92.67239111
225	42.54961319	0.00116559	-69.209376	0.00133258	-97.78524938
226	42.71779347	0.0012345	-75.53725145	0.0014101	-104.018286
227	42.88597376	0.00132323	-83.11526507	0.0015101	-111.502036
228	43.05415405	0.00142445	268.1438678	0.00162418	-120.14921
229	43.22233434	0.00153231	258.4211808	0.00174564	-129.7787698
230	43.39051463	0.00164242	247.9108184	0.00186946	-140.196566
231	43.55869492	0.00175169	236.7837213	0.00199213	-151.2316536
232	43.72687521	0.00185801	225.1772989	0.00211126	-162.7466186
233	43.8950555	0.00196006	213.1965786	0.00222535	-174.6364291
234	44.06323579	0.00205706	200.9191742	0.00233353	173.1765332
235	44.23141608	0.00214865	188.4008215	0.00243543	160.7480085
236	44.39959637	0.00223477	175.6803638	0.00253098	148.1168444
237	44.56777666	0.00231554	162.7839477	0.00262034	135.3091918
238	44.73595695	0.00239118	149.7284909	0.00270377	122.3419728
239	44.90413724	0.00246193	136.5245456	0.00278157	109.2257438
240	45.07231752	0.00252802	123.1786611	0.002854	95.96705824
241	45.24049781	0.00258959	109.6953143	0.00292124	82.57039729
242	45.4086781	0.00264669	96.07844393	0.00298336	69.03970366
243	45.57685839	0.00269924	82.33260788	0.00304028	55.37953944
244	45.74503868	0.00274706	68.46378313	0.00309181	41.59588563
245	45.91321897	0.00278982	54.47983198	0.00313759	27.69660852
246	46.08139926	0.0028271	40.39067299	0.00317716	13.69163064
247	46.24957955	0.00285836	26.20820598	0.00320994	-0.40714424
248	46.41775984	0.00288304	11.94604947	0.0032353	-14.58609372
249	46.58594013	0.0029005	-2.38084804	0.00325256	-28.83026545
250	46.75412042	0.00291012	-16.75666398	0.00326102	-43.12383302
251	46.92230071	0.0029113	-31.16517343	0.00326003	-57.45056773
252	47.090481	0.00290352	-45.5901966	0.00324905	-71.79428605
253	47.25866128	0.00288638	-60.01599482	0.00322764	-86.1392456
254	47.42684157	0.00285963	-74.42760095	0.00319552	-100.4704755
255	47.59502186	0.00282318	-88.81108186	0.00315265	-114.7740391
256	47.76320215	0.00277718	256.84626	0.00309919	-129.0372352
257	47.93138244	0.00272197	242.5557324	0.00303555	-143.2487523
258	48.09956273	0.00265814	228.3271311	0.0029624	-157.3987913
259	48.26774302	0.00258647	214.1686312	0.00288064	-171.4791735
260	48.43592331	0.00250793	200.0866824	0.00279136	174.5165542
261	48.6041036	0.00242367	186.0858995	0.00269584	160.5930102
262	48.77228389	0.00233492	172.1689538	0.00259546	146.7528692
263	48.94046418	0.00224297	158.3364812	0.00249168	132.9967702
264	49.10864447	0.00214912	144.5870365	0.00238593	119.3232716
265	49.27682476	0.0020546	130.9171397	0.00227958	105.7288967
266	49.44500505	0.00196053	117.3214673	0.00217386	92.20832522
267	49.61318533	0.00186786	103.7932455	0.00206985	78.75478667

268	49.78136562	0.00177734	90.32489469	0.00196835	65.36070459
269	49.94954591	0.00168949	76.90894967	0.00186994	52.01861704
270	50.1177262	0.00160462	63.53924896	0.00177495	38.72236567
271	50.28590649	0.00152277	50.21234691	0.00168342	25.46850796
272	50.45408678	0.00144378	36.92907396	0.00159517	12.25787748
273	50.62226707	0.00136733	23.69616352	0.00150983	-0.90278931
274	50.79044736	0.00129294	10.52789179	0.00142687	-13.99921314
275	50.95862765	0.00122004	-2.5522557	0.00134565	-27.00790548
276	51.12680794	0.00114803	-15.50977275	0.00126551	-39.89435712
277	51.29498823	0.00107634	-28.29692433	0.00118582	-52.61083008
278	51.46316852	0.0010045	-40.84973368	0.00110606	-65.09334466
279	51.63134881	0.0009322	-53.08358605	0.00102589	-77.2572832
280	51.7995291	0.00085938	-64.88671117	0.00094523	-88.99087257
281	54.49041372	0.00081423	188.1328586	0.00088836	165.0921045
282	54.65859401	0.00087127	176.3626262	0.00095014	153.385397
283	54.8267743	0.00092516	164.1071677	0.00100844	141.1931329
284	54.99495459	0.00097579	151.4484539	0.00106313	128.5972853
285	55.16313488	0.00102325	138.4447292	0.00111433	115.6561013
286	55.33131517	0.0010678	125.1382105	0.00116231	102.4118
287	55.49949546	0.0011098	111.560765	0.00120749	88.89625079
288	55.66767575	0.00114964	97.73807518	0.00125028	75.13513879
289	55.83585604	0.0011877	83.69263183	0.00129109	61.15095693
290	56.00403633	0.00122431	69.44576251	0.0013303	46.9650351
291	56.17221662	0.00125967	55.01883551	0.00136812	32.59874385
292	56.34039691	0.00129389	40.43375486	0.00140468	18.07398948
293	56.50857719	0.00132689	25.71287517	0.00143989	3.41312882
294	56.67675748	0.00135845	10.87848942	0.00147351	-11.36154295
295	56.84493777	0.00138817	-4.04793902	0.0015051	-26.22856025
296	57.01311806	0.00141549	-19.04663059	0.00153408	-41.16814135
297	57.18129835	0.00143973	-34.10028638	0.0015597	-56.16298521
298	57.34947864	0.00146013	-49.19472835	0.00158114	-71.19891164
299	57.51765893	0.00147586	-64.31933552	0.00159753	-86.26529755
300	57.68583922	0.00148612	-79.46727634	0.00160798	-101.3553093
301	57.85401951	0.00149018	265.3644277	0.00161171	-116.4659663
302	58.0221998	0.00148738	250.1749537	0.00160804	-131.5980893
303	58.19038009	0.00147725	234.9597862	0.00159646	-146.7561919
304	58.35856038	0.00145951	219.710832	0.00157667	-161.9483652
305	58.52674067	0.0014341	204.4165028	0.00154862	-177.1861955
306	58.69492096	0.00140119	189.0617428	0.00151249	167.5152634
307	58.86310124	0.00136118	173.6279945	0.00146874	152.1374561
308	59.03128153	0.00131471	158.0931145	0.00141805	136.6582409
309	59.19946182	0.00126261	142.4312647	0.00136133	121.0517818
310	59.36764211	0.00120587	126.6128282	0.00129968	105.2884638
311	59.5358224	0.00114564	110.6044152	0.0012343	89.33489892
312	59.70400269	0.00108312	94.36904893	0.00116651	73.15411235

313	59.87218298	0.00101957	77.86663681	0.00109766	56.70601335
314	60.04036327	0.00095621	61.05483844	0.00102907	39.94826339
315	60.20854356	0.00089422	43.89041812	0.00096201	22.8376286
316	60.37672385	0.00083466	26.33110049	0.00089761	5.33183542
317	63.90850992	0.00085715	-48.26586164	0.00091542	-68.19835921
318	64.07669021	0.00090872	-66.20482128	0.0009702	-86.08910797
319	64.2448705	0.00095727	-83.76584216	0.00102172	-103.6021412
320	64.41305079	0.00100156	258.9862765	0.00106867	-120.8022568
321	64.58123108	0.00104054	241.9935636	0.00110993	-137.7474242
322	64.74941137	0.00107344	225.2049107	0.00114468	-154.4887505
323	64.91759166	0.00109971	208.5756274	0.00117236	-171.0709247
324	65.08577195	0.00111911	192.0668377	0.0011927	172.4671789
325	65.25395224	0.00113164	175.6448976	0.00120569	156.0919173
326	65.42213253	0.00113753	159.2809214	0.00121162	139.7744065
327	65.59031282	0.00113724	142.950452	0.00121097	123.4901907
328	65.7584931	0.0011314	126.6332677	0.0012044	107.2190497
329	65.92667339	0.00112075	110.313289	0.00119273	90.94490524
330	66.09485368	0.00110611	93.9785188	0.00117683	74.65576157
331	66.26303397	0.00108832	77.62092548	0.00115758	58.34358851
332	66.43121426	0.00106817	61.23616221	0.00113583	42.00404053
333	66.59939455	0.00104637	44.82301361	0.00111234	25.63590359
334	66.76757484	0.00102348	28.38248559	0.00108771	9.2401849
335	66.93575513	0.00099992	11.91650196	0.00106239	-7.18119041
336	67.10393542	0.00097593	-4.57376112	0.00103663	-23.62704488
337	67.27211571	0.00095158	-21.0898043	0.00101049	-40.0988779
338	67.440296	0.00092677	-37.63785564	0.00098388	-56.60291622
339	67.60847629	0.00090126	-54.23090021	0.00095655	-73.15214368
340	67.77665658	0.00087472	-70.89059752	0.00092814	-89.76821851
341	67.94483687	0.00084678	-87.64908414	0.00089826	-106.4832761
342	68.11301715	0.00081706	255.4492393	0.00086652	-123.3417157
343	71.64480323	0.00083328	180.6232549	0.00087929	162.6979679
344	71.81298352	0.00087236	162.8377013	0.00092033	144.9517166
345	71.98116381	0.00090887	145.2950025	0.00095864	127.4481536
346	72.1493441	0.00094299	127.9522755	0.00099441	110.144397
347	72.31752439	0.00097505	110.7816286	0.00102799	93.0125562
348	72.48570468	0.00100541	93.76699199	0.00105977	76.03656238
349	72.65388496	0.00103447	76.90110235	0.00109016	59.20915317
350	72.82206525	0.00106253	60.182607	0.00111951	42.52897689
351	72.99024554	0.00108985	43.61332774	0.00114804	25.99785632
352	73.15842583	0.00111652	27.19579183	0.00117589	9.61831969
353	73.32660612	0.00114252	10.9311689	0.00120302	-6.60846241
354	73.49478641	0.00116768	-5.18226502	0.00122926	-22.68421298
355	73.6629667	0.00119169	-21.15007246	0.00125427	-38.61449361
356	73.83114699	0.00121413	-36.98202027	0.00127763	-54.40907021
357	73.99932728	0.0012345	-52.69194756	0.0012988	-70.08178096

358	74.16750757	0.00125221	-68.29726316	0.00131716	-85.65003375
359	74.33568786	0.00126664	-83.81821632	0.00133208	-101.1340769
360	74.50386815	0.0012772	260.7229268	0.00134292	-116.5561758
361	74.67204844	0.00128331	245.3026958	0.00134907	-131.9397996
362	74.84022873	0.00128445	229.8971508	0.00135	-147.3088876
363	75.00840901	0.0012802	214.4825037	0.00134528	-162.687227
364	75.1765893	0.00127029	199.0356249	0.0013346	-178.0979463
365	75.34476959	0.00125455	183.5344513	0.00131781	166.4368921
366	75.51294988	0.00123299	167.9583261	0.00129491	150.8966324
367	75.68113017	0.00120577	152.2883048	0.00126608	135.2623308
368	75.84931046	0.00117319	136.5074576	0.00123164	119.5170584
369	76.01749075	0.00113569	120.6011862	0.00119205	103.646218
370	76.18567104	0.00109383	104.5575531	0.00114789	87.63787254
371	76.35385133	0.00104822	88.3675902	0.00109983	71.48305509
372	76.52203162	0.00099952	72.02551589	0.00104853	55.17598472
373	76.69021191	0.00094838	55.52873901	0.0009947	38.71407113
374	76.8583922	0.00089539	38.87747808	0.00093895	22.09753365
375	77.02657249	0.00084107	22.07376893	0.00088183	5.32840895
376	81.06289943	0.00085648	218.8759786	0.00089436	-157.0790461
377	81.23107972	0.00091878	202.911472	0.00095927	-173.0121961
378	81.39926001	0.00097678	186.9709335	0.00101966	171.0785023
379	81.5674403	0.00103011	171.0209303	0.00107516	155.1596167
380	81.73562059	0.0010785	155.0392617	0.00112549	139.2089473
381	81.90380087	0.00112182	139.0129288	0.00117053	123.2134956
382	82.07198116	0.00116006	122.9367852	0.00121025	107.1681162
383	82.24016145	0.00119328	106.8125488	0.00124472	91.07452732
384	82.40834174	0.00122162	90.64795413	0.00127409	74.94046435
385	82.57652203	0.00124525	74.45589984	0.00129854	58.77882644
386	82.74470232	0.00126435	58.253499	0.00131825	42.60672736
387	82.91288261	0.00127907	42.06099467	0.00133341	26.44441079
388	83.0810629	0.00128954	25.90055032	0.00134413	10.31404081
389	83.24924319	0.00129583	9.79496753	0.00135048	-5.76158036
390	83.41742348	0.00129795	-6.23358987	0.0013525	-21.76028828
391	83.58560377	0.00129588	-22.16477743	0.00135015	-37.66173789
392	83.75378406	0.00128956	-37.98108046	0.00134337	-53.44841388
393	83.92196435	0.00127892	-53.66860126	0.0013321	-69.10641797
394	84.09014464	0.00126391	-69.21760281	0.00131628	-84.62601251
395	84.25832492	0.00124451	-84.62281738	0.00129589	-100.0019292
396	84.42650521	0.00122075	260.1164514	0.00127097	-115.2334711
397	84.5946855	0.00119271	244.9963964	0.00124161	-130.3244447
398	84.76286579	0.00116056	230.0089101	0.00120798	-145.2829569
399	84.93104608	0.00112453	215.1418996	0.0011703	-160.1211002
400	85.09922637	0.00108487	200.3797019	0.00112888	-174.8545368
401	85.26740666	0.00104192	185.7036022	0.00108404	170.4980189
402	85.43558695	0.00099602	171.0924655	0.00103614	155.9154325

403	85.60376724	0.00094753	156.5234977	0.00098556	141.3749106
404	85.77194753	0.00089681	141.9731503	0.00093268	126.8529051
405	85.94012782	0.00084421	127.4181818	0.00087787	112.3261751
406	91.49007736	0.00082018	165.1232755	0.00084947	150.9085531
407	91.65825765	0.00083669	151.1551192	0.00086648	136.9654245
408	91.82643794	0.00085134	137.143716	0.00088155	122.9789628
409	91.99461823	0.00086445	123.0711268	0.00089503	108.9312294
410	92.16279852	0.0008763	108.9225176	0.0009072	94.80739054
411	92.33097881	0.0008871	94.68728112	0.00091828	80.59683969
412	92.4991591	0.00089699	80.35989307	0.00092841	66.29405275
413	92.66733939	0.00090601	65.94039849	0.00093765	51.89907526
414	92.83551968	0.00091415	51.43447391	0.00094598	37.41758416
415	93.00369997	0.0009213	36.85306453	0.00095327	22.86052507
416	93.17188026	0.00092726	22.21165498	0.00095934	8.24338303
417	93.34006054	0.00093179	7.52927794	0.00096392	-6.41480888
418	93.50824083	0.00093456	-7.17260929	0.00096669	-21.09259291
419	93.67642112	0.00093525	-21.87124812	0.0009673	-35.76721009
420	93.84460141	0.00093348	-36.54359012	0.00096537	-50.41561159
421	94.0127817	0.00092893	-51.1671201	0.00096057	-65.01528181
422	94.18096199	0.00092129	-65.72045622	0.00095257	-79.54483851
423	94.34914228	0.00091033	-80.18373265	0.00094114	-93.98441545
424	94.51732257	0.0008959	265.4611985	0.00092613	-108.3158643
425	94.68550286	0.00087796	251.2306887	0.0009075	-122.5228334
426	94.85368315	0.00085661	237.1392706	0.00088533	-136.5907895
427	95.02186344	0.00083203	223.1996255	0.00085985	-150.507051
428	95.19004373	0.00080455	209.4224821	0.00083137	-164.2608887
429	103.4308779	0.00081281	10.35713846	0.0008363	-2.27241588
430	103.5990582	0.00082317	-4.23438171	0.00084689	-16.84408969
431	103.7672385	0.00083294	-18.8642738	0.00085688	-31.45419669
432	103.9354188	0.00084175	-33.53215183	0.00086588	-46.10235061
433	104.1035991	0.00084913	-48.23828555	0.0008734	-60.78882094
434	104.2717794	0.00085457	-62.98358835	0.00087892	-75.51452079
435	104.4399596	0.00085753	-77.76958366	0.0008819	-90.28097332
436	104.6081399	0.00085751	267.4016505	0.00088182	-105.0902562
437	104.7763202	0.00085404	252.527559	0.00087819	-119.9449245
438	104.9445005	0.00084673	237.6052086	0.0008706	-134.847911
439	105.1126808	0.00083529	222.6314125	0.00085877	-149.8024023
440	105.2808611	0.00081953	207.6028849	0.00084251	-164.8116839

Tabla 79: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente de los cables sin enterrar colocados en el vial del campus.

Armónico	Frecuencia	Módulo medido	fase medida (°)	Módulo real	Fase real(°)
1	0.6896552	0.24955588	124.7870495	4.2173008	38.18626246
2	1.3793103	0.3034109	97.01386201	2.57718867	13.78852586
3	2.0689655	0.15451068	95.46319932	0.88252495	15.56677289
4	2.7586207	0.30347787	154.3399332	1.31550714	77.70495923
5	3.4482759	0.63257731	133.0209017	2.2263842	59.56157389
6	4.137931	0.8301539	103.205762	2.47783885	32.82096309
7	4.8275862	0.82643936	73.68186255	2.15695212	6.2584328
8	5.5172414	0.62425277	47.2420217	1.45740809	-17.34197291
9	6.2068966	0.29074556	37.26580187	0.61795127	-24.60637669
10	6.8965517	0.27348691	108.1800981	0.53660627	48.88920722
11	7.5862069	0.62869944	101.5268186	1.15172233	44.68616533
12	8.2758621	0.87212608	76.52111371	1.50558685	22.00109082
13	8.9655172	0.91862525	49.18561424	1.50607151	-3.1403909
14	9.6551724	0.75326829	22.77935128	1.18048023	-27.47508487
15	10.3448276	0.42237438	4.3994208	0.63620338	-43.90090145
16	11.0344828	0.19367418	57.21563863	0.28170399	10.75751439
17	11.7241379	0.51750421	77.79337692	0.72979272	33.07138564
18	12.4137931	0.80471258	56.33871152	1.1040518	13.25276696
19	13.1034483	0.91521945	30.13291894	1.22527128	-11.41110131
20	13.7931034	0.81700515	3.52039865	1.07007513	-36.56997495
21	14.4827586	0.53205796	-19.21962907	0.68329784	-57.93898205
22	15.1724138	0.19240615	-4.58634326	0.24276585	-42.0118949
23	15.862069	0.38556527	55.44426627	0.47877862	19.24042799
24	16.5517241	0.70321954	38.61534075	0.86070916	3.56596626
25	17.2413793	0.86775818	13.22264973	1.04827619	-20.7349704
26	17.9310345	0.83373775	-13.34398022	0.99525383	-46.2683128
27	18.6206897	0.60992742	-37.82018431	0.72022437	-69.765743
28	19.3103448	0.27263013	-46.00905048	0.31875446	-77.02667437
29	20	0.25573851	28.29967107	0.29630224	-1.83744698
30	20.6896552	0.58265854	22.47084913	0.66947537	-6.83003212
31	21.3793103	0.80198837	-1.58312011	0.91445414	-30.0891078
32	22.0689655	0.83834141	-28.34584881	0.94918389	-56.09557838
33	22.7586207	0.68000545	-54.46534262	0.7649158	-81.49494494
34	23.4482759	0.37422859	-73.13939428	0.41843046	-99.48268337
35	24.137931	0.15788912	-16.18171462	0.17555638	-41.87036135
36	24.8275862	0.45623522	5.29247605	0.50466858	-19.77121587
37	25.5172414	0.71508077	-16.8492751	0.7871991	-41.31586424
38	26.2068966	0.80927383	-43.56508289	0.88691443	-67.46072139
39	26.8965517	0.71425913	-70.4024098	0.77952622	-93.75167487
40	27.5862069	0.46052101	266.7199361	0.50064933	-116.1060723
41	28.2758621	0.15889328	-80.35224262	0.17211127	-102.6767566
42	28.9655172	0.3222073	-14.94177189	0.3478243	-36.78529598

43	29.6551724	0.60261141	-32.35487646	0.64844855	-53.73674651
44	30.3448276	0.74736577	-58.52581226	0.80180808	-79.46427769
45	31.0344828	0.71548651	-85.76102117	0.76544927	-106.2733204
46	31.7241379	0.52239195	249.0376988	0.55739331	-131.0647311
47	32.4137931	0.2319906	237.3734751	0.24691816	-142.3345045
48	33.1034483	0.19116219	-40.81983	0.20298504	-60.14795988
49	33.7931034	0.4761749	-46.82964615	0.5045049	-65.79176257
50	34.4827586	0.66664328	-72.29083908	0.70482701	-90.90006404
51	35.1724138	0.69532435	259.7186884	0.73369592	-118.5500993
52	35.862069	0.55884258	232.5310624	0.58857772	-145.4091172
53	36.5517241	0.30322719	211.8042232	0.31879462	-165.818592
54	37.9310345	0.35307409	-63.47105344	0.36998391	-80.49070933
55	38.6206897	0.56181322	-86.81930553	0.5878269	-103.5521681
56	39.3103448	0.63677784	245.7479794	0.6653015	-130.707332
57	40	0.56277987	218.1424953	0.58718189	-158.0440797
58	40.6896552	0.3636523	193.3361734	0.37892436	177.4099221
59	42.0689655	0.23295487	-80.71430532	0.24214797	-96.14365466
60	42.7586207	0.45452633	259.4010505	0.47192797	-115.7910269
61	43.4482759	0.56595042	232.1871829	0.58698216	-142.7746453
62	44.137931	0.54405812	204.247366	0.56369292	-170.4909356
63	44.8275862	0.40109498	177.4555654	0.41515949	162.9343514
64	45.5172414	0.17475315	159.5640364	0.18070984	145.2537394
65	46.2068966	0.12297126	256.8081923	0.12704776	-117.2971044
66	46.8965517	0.34671914	246.3210785	0.35790218	-127.5848943
67	47.5862069	0.48701468	219.0694734	0.50230485	-154.6426237
68	48.2758621	0.50722607	190.4180362	0.52273369	176.8945826
69	48.9655172	0.41184949	162.2386625	0.42411641	148.8988252
70	49.6551724	0.22633834	137.105387	0.23290862	123.9443336
71	51.0344828	0.25150288	233.8688733	0.25844568	-138.9483791
72	51.7241379	0.41212289	206.2197748	0.42322351	-166.4321176
73	52.4137931	0.46553964	176.3899158	0.47777917	163.8992381
74	53.1034483	0.40821114	147.0054078	0.41869052	134.6719508
75	53.7931034	0.26314997	119.4230325	0.2697485	107.2429466
76	55.1724138	0.15004381	218.0365387	0.15363707	-153.8478099
77	55.862069	0.31434462	193.0694984	0.32170503	-178.6722277
78	56.5517241	0.39646991	162.9666101	0.40554957	151.3641702
79	57.2413793	0.37939417	132.3047218	0.38789474	120.8383462
80	57.9310345	0.27436241	102.0881521	0.28037846	90.75472767
81	60	0.2321847	181.2482546	0.23696517	170.2960253
82	60.6896552	0.32739023	150.2167333	0.33399459	139.3860012
83	61.3793103	0.33939628	118.5662658	0.34610621	107.8543959
84	62.0689655	0.27107947	86.81020539	0.27633322	76.21464668
85	62.7586207	0.14332039	54.81559096	0.14604407	44.33387264
86	64.137931	0.15522134	170.5753905	0.15805978	160.3142456
87	64.8275862	0.25208464	138.0287549	0.25660815	127.8744879

88	65.5172414	0.28242771	105.927592	0.28740213	95.87802202
89	66.2068966	0.24705261	74.11306756	0.25132463	64.16607923
90	66.8965517	0.15988601	41.32825911	0.16260097	31.48179977
91	68.9655172	0.18582936	129.1252088	0.18882147	119.5686133
92	69.6551724	0.23027023	94.03599772	0.23391435	84.57230211
93	70.3448276	0.21480594	60.16111576	0.21814777	50.78854724
94	71.0344828	0.15364583	26.40597954	0.15599618	17.12281513
95	73.1034483	0.12554459	124.0933281	0.12737249	115.0685094
96	73.7931034	0.1786447	86.12018446	0.18120423	77.17834069
97	74.4827586	0.18417626	49.84114226	0.18677345	40.98077367
98	75.1724138	0.14755292	13.52136501	0.14960124	4.7410118
99	77.9310345	0.12952958	78.31136987	0.13122125	69.83723198
100	78.6206897	0.14291906	38.375722	0.14475814	29.97485327

Tabla 80: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente de los cables sin enterrar colocados en el vial del campus amplificada por 1000.

Armónico	Frecuencia	Módulo medido	fase medida (°)	Módulo real	Fase real(°)
1	0.68965517	248.8235705	124.7870495	4204.925506	38.18626232
2	1.37931034	302.5205456	97.01386201	2569.625871	13.78852608
3	2.06896552	154.0572712	95.46319932	879.9351887	15.56677297
4	2.75862069	302.5873273	154.3399332	1311.646841	77.70495919
5	3.44827586	630.721029	133.0209017	2219.850961	59.56157372
6	4.13793103	827.7178438	103.205762	2470.567708	32.82096324
7	4.82758621	824.0142041	73.68186255	2150.622621	6.25843284
8	5.51724138	622.4209172	47.2420217	1453.131367	-17.34197299
9	6.20689655	289.8923744	37.26580187	616.1379161	-24.60637687
10	6.89655172	272.6843695	108.1800981	535.0316118	48.88920731
11	7.5862069	626.854545	101.5268186	1148.342639	44.68616532
12	8.27586207	869.5668541	76.52111371	1501.168756	22.00109072
13	8.96551724	915.9295691	49.18561424	1501.651976	-3.14039077
14	9.65517241	751.0578444	22.77935128	1177.016142	-27.47508483
15	10.34482759	421.1349355	4.3994208	634.3364619	-43.90090148
16	11.03448276	193.1058504	57.21563863	280.8773452	10.75751429
17	11.72413793	515.9856103	77.79337692	727.651169	33.07138571
18	12.4137931	802.3511746	56.33871152	1100.811987	13.25276697
19	13.10344828	912.5337652	30.13291894	1221.675756	-11.41110136
20	13.79310345	814.6076744	3.52039865	1066.935027	-36.56997485
21	14.48275862	530.4966483	-19.21962907	681.2927187	-57.93898201
22	15.17241379	191.8415389	-4.58634326	242.0534568	-42.01189491
23	15.86206897	384.4338438	55.44426627	477.3736628	19.24042793
24	16.55172414	701.1559669	38.61534075	858.1834415	3.56596632
25	17.24137931	865.2117698	13.22264973	1045.200056	-20.73497038
26	17.93103448	831.2911755	-13.34398022	992.3332893	-46.26831282
27	18.62068966	608.1376061	-37.82018431	718.1108915	-69.76574306
28	19.31034483	271.8301087	-46.00905048	317.8190901	-77.02667433
29	20	254.9880535	28.29967107	295.4327551	-1.83744699
30	20.68965517	580.948745	22.47084913	667.5108108	-6.83003215
31	21.37931034	799.6349624	-1.58312011	911.7707093	-30.08910775
32	22.06896552	835.8813261	-28.34584881	946.3985408	-56.09557837
33	22.75862069	678.0099902	-54.46534262	762.6711735	-81.49494496
34	23.44827586	373.1304316	-73.13939428	417.2025901	-99.4826834
35	24.13793103	157.4257991	-16.18171462	175.0412103	-41.87036131
36	24.82758621	454.8964126	5.29247605	503.1876473	-19.77121586
37	25.51724138	712.9823841	-16.8492751	784.8890843	-41.31586425
38	26.20689655	806.8990434	-43.56508289	884.3118117	-67.46072143
39	26.89655172	712.1631598	-70.4024098	777.238723	-93.75167486
40	27.5862069	459.1696293	266.7199361	499.1801918	-116.1060723
41	28.27586207	158.4270154	-80.35224262	171.606222	-102.6767567
42	28.96551724	321.2617942	-14.94177189	346.8036199	-36.78529596

43	29.65517241	600.8430675	-32.35487646	646.5457014	-53.7367465
44	30.34482759	745.1726502	-58.52581226	799.4552053	-79.4642777
45	31.03448276	713.3869364	-85.76102117	763.2030818	-106.2733204
46	31.72413793	520.8590027	249.0376988	555.7576566	-131.064731
47	32.4137931	231.3098259	237.3734751	246.1935822	-142.3345045
48	33.10344828	190.6012288	-40.81983	202.3893867	-60.14795989
49	33.79310345	474.7775819	-46.82964615	503.0244466	-65.79176254
50	34.48275862	664.6870334	-72.29083908	702.7587106	-90.90006403
51	35.17241379	693.2839391	259.7186884	731.5429133	-118.5500993
52	35.86206897	557.2026695	232.5310624	586.8505521	-145.4091172
53	36.55172414	302.3373771	211.8042232	317.8591205	-165.818592
54	37.93103448	352.038008	-63.47105344	368.8982027	-80.49070933
55	38.62068966	560.1646009	-86.81930553	586.1019406	-103.5521681
56	39.31034483	634.9092375	245.7479794	663.3491991	-130.707332
57	40	561.1284105	218.1424953	585.458823	-158.0440797
58	40.68965517	362.5851692	193.3361734	377.8124089	177.4099221
59	42.06896552	232.2712746	-80.71430532	241.4374026	-96.14365466
60	42.75862069	453.1925379	259.4010505	470.5431158	-115.7910269
61	43.44827586	564.289659	232.1871829	585.2596869	-142.7746453
62	44.13793103	542.461597	204.247366	562.038775	-170.4909356
63	44.82758621	399.9179822	177.4555654	413.9412245	162.9343514
64	45.51724138	174.2403472	159.5640364	180.1795608	145.2537394
65	46.20689655	122.6104007	256.8081923	126.6749354	-117.2971044
66	46.89655172	345.7017033	246.3210785	356.8519249	-127.5848943
67	47.5862069	485.5855468	219.0694734	500.8308509	-154.6426237
68	48.27586207	505.737631	190.4180362	521.1997445	176.8945826
69	48.96551724	410.640927	162.2386625	422.8718469	148.8988252
70	49.65517241	225.6741598	137.105387	232.2251577	123.9443336
71	51.03448276	250.7648497	233.8688733	257.6872766	-138.9483791
72	51.72413793	410.9135277	206.2197748	421.9815777	-166.4321176
73	52.4137931	464.1735303	176.3899158	476.3771482	163.8992381
74	53.10344828	407.013254	147.0054078	417.4618783	134.6719508
75	53.79310345	262.3777685	119.4230325	268.956937	107.2429466
76	55.17241379	149.6035065	218.0365387	153.1862177	-153.8478099
77	55.86206897	313.4221837	193.0694984	320.7609937	-178.6722277
78	56.55172414	395.3064791	162.9666101	404.3594965	151.3641703
79	57.24137931	378.2808473	132.3047218	386.7564741	120.8383462
80	57.93103448	273.557303	102.0881521	279.5557026	90.75472766
81	60	231.5033588	181.2482546	236.2698002	170.2960254
82	60.68965517	326.4295167	150.2167333	333.0144953	139.3860012
83	61.37931034	338.40033	118.5662658	345.0905716	107.8543959
84	62.06896552	270.2839933	86.81020539	275.5223257	76.21464669
85	62.75862069	142.8998231	54.81559096	145.6155081	44.33387264
86	64.13793103	154.7658445	170.5753905	157.5959554	160.3142457
87	64.82758621	251.3449006	138.0287549	255.8551411	127.8744879

88	65.51724138	281.5989394	105.927592	286.558765	95.87802202
89	66.20689655	246.3276389	74.11306756	250.5871208	64.16607922
90	66.89655172	159.4168344	41.32825911	162.1238238	31.48179978
91	68.96551724	185.2840529	129.1252088	188.2673788	119.5686133
92	69.65517241	229.5945053	94.03599772	233.2279305	84.57230212
93	70.34482759	214.1755946	60.16111576	217.5076195	50.78854723
94	71.03448276	153.1949625	26.40597954	155.5384143	17.12281513
95	73.10344828	125.1761826	124.0933281	126.9987174	115.0685094
96	73.79310345	178.1204742	86.12018446	180.6724975	77.17834069
97	74.48275862	183.635799	49.84114226	186.2253644	40.98077368
98	75.17241379	147.1199271	13.52136501	149.1622316	4.7410118
99	77.93103448	129.1494777	78.31136987	130.8361832	69.83723198
100	78.62068966	142.4996662	38.375722	144.3333453	29.97485327

Tabla 81: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente de los cables sin enterrar colocados en el vial del campus distancia de seguridad 70km/h.

Armónico	Frecuencia	Módulo medido	fase medida (°)	Módulo real	Fase real(°)
1	0.61741099	0.07449469	120.6587054	1.40571772	33.70254554
2	0.82321465	0.08940054	118.4284273	1.26663036	32.48391682
3	1.02901832	0.10252597	114.000875	1.1637072	29.06548767
4	1.23482198	0.11300055	108.3934368	1.07066219	24.46403236
5	1.44062564	0.12028878	102.1675623	0.97887099	19.24039821
6	1.64642931	0.12408834	95.67183641	0.88561475	13.74258155
7	1.85223297	0.12428812	89.15797082	0.79054199	8.22172078
8	2.05803663	0.12094687	82.8446476	0.69437302	2.89594226
9	2.2638403	0.11427977	76.96475164	0.59835579	-2.00240579
10	2.46964396	0.10465247	71.81861561	0.50403124	-6.17350685
11	2.67544762	0.09259106	67.8596982	0.41318123	-9.16439645
12	2.88125129	0.07883469	65.86087	0.32797921	-10.20267515
13	4.11607327	0.07109453	133.9822696	0.21320275	63.5017089
14	4.32187693	0.08930464	135.7958954	0.2565146	66.21244356
15	4.52768059	0.10840378	134.7385523	0.29897885	66.04187355
16	4.73348426	0.1276441	132.0685868	0.33879753	64.2481059
17	4.93928792	0.14659913	128.4385996	0.37524915	61.48352665
18	5.14509158	0.16498465	124.2002219	0.40805194	58.09957787
19	5.35089525	0.18257845	119.5524729	0.43709624	54.29511342
20	5.55669891	0.19918235	114.6141355	0.46232787	50.18877473
21	5.76250257	0.21460527	109.4607029	0.48370109	45.85593632
22	5.96830624	0.22865861	104.1440553	0.50116672	41.34838145
23	6.1741099	0.24115914	98.70317531	0.51467835	36.70501714
24	6.37991356	0.2519361	93.16994184	0.52420648	31.95766651
25	6.58571723	0.26083974	87.57211381	0.52975358	27.13405194
26	6.79152089	0.26774923	81.93469753	0.53136609	22.25916131
27	6.99732455	0.27257823	76.28041685	0.52914056	17.35571713
28	7.20312822	0.27527722	70.62974687	0.52322328	12.44420928
29	7.40893188	0.27583236	65.00082369	0.51380383	7.5428037
30	7.61473554	0.27426113	59.4094553	0.50110393	2.66735233
31	7.82053921	0.27060582	53.86940724	0.48536392	-2.16832225
32	8.02634287	0.2649261	48.39310398	0.46682925	-6.95172642
33	8.23214653	0.25729207	42.99286914	0.4457393	-11.67045618
34	8.4379502	0.24777929	37.68282734	0.42232064	-16.31029629
35	8.64375386	0.23646667	32.48162651	0.39678572	-20.8524988
36	8.84955752	0.22343806	27.41624834	0.36933758	-25.26997344
37	9.05536119	0.20878744	22.52742636	0.34018003	-29.52187039
38	9.26116485	0.19262771	17.87771712	0.30953256	-33.54550987
39	9.46696851	0.17510293	13.56434586	0.27764969	-37.24353718
40	9.67277218	0.15640513	9.74118284	0.24484587	-40.46194712
41	9.87857584	0.13679952	6.65899909	0.21153176	-42.94982887
42	10.0843795	0.11666917	4.74358273	0.17827792	-44.28125034

43	10.29018317	0.09660865	4.75233932	0.14594852	-43.69865833
44	10.49598683	0.07764167	8.07177124	0.11601222	-39.81539982
45	11.52500515	0.08046657	77.12252699	0.11445026	31.9097822
46	11.73080881	0.09911571	79.77957814	0.13973521	35.07388175
47	11.93661247	0.11851146	79.54871086	0.16566043	35.34115529
48	12.14241614	0.13783455	77.63318196	0.1910904	33.91501898
49	12.3482198	0.15662901	74.6840029	0.21542553	31.44664315
50	12.55402346	0.17460883	71.06418283	0.2383154	28.29919515
51	12.75982712	0.19157011	66.98486218	0.25952933	24.68397271
52	12.96563079	0.20734743	62.57402168	0.27889281	20.72911273
53	13.17143445	0.22179095	57.91261618	0.29625466	16.51572492
54	13.37723811	0.23475526	53.05459847	0.31147126	12.09791548
55	13.58304178	0.24609584	48.0385287	0.32440144	7.51439635
56	13.78884544	0.25567099	42.89449421	0.33490879	2.79540493
57	13.9946491	0.2633474	37.64824561	0.3428687	-2.03315999
58	14.20045277	0.26900776	32.32359645	0.34817774	-6.94733862
59	14.40625643	0.27255883	26.94371202	0.35076336	-11.92382148
60	14.61206009	0.27393858	21.53169339	0.35059212	-16.93936543
61	14.81786376	0.2731212	16.11074151	0.3476751	-21.97062963
62	15.02366742	0.27011946	10.70411617	0.34206972	-26.99421663
63	15.22947108	0.2649839	5.33506786	0.33387775	-31.98674058
64	15.43527475	0.25779927	0.02690796	0.32323989	-36.92475704
65	15.64107841	0.24867863	-5.19660498	0.3103277	-41.78437673
66	15.84688207	0.23775613	-10.31034573	0.29533424	-46.54034606
67	16.05268574	0.22517968	-15.28607288	0.27846469	-51.16429764
68	16.2584894	0.21110467	-20.08940333	0.25992879	-55.62172476
69	16.46429306	0.19569024	-24.67477831	0.2399363	-59.86694742
70	16.67009673	0.17909927	-28.97711633	0.21869734	-63.83476529
71	16.87590039	0.1615036	-32.89765727	0.19642896	-67.42630174
72	17.08170405	0.14309689	-36.27893253	0.17337085	-70.48397406
73	17.28750772	0.12412	-38.85807665	0.14981572	-72.74480497
74	17.49331138	0.10491144	-40.17483879	0.12616931	-73.74843418
75	17.69911504	0.08601582	-39.38416789	0.10307857	-72.64970344
76	18.93393702	0.07843313	36.52067171	0.09219027	5.00267975
77	19.13974069	0.09658592	38.4228948	0.11319475	7.18026495
78	19.34554435	0.11519747	37.70018058	0.13462187	6.72861791
79	19.55134801	0.1335569	35.44285969	0.15564364	4.73815714
80	19.75715168	0.15124135	32.24082833	0.17577579	1.7988647
81	19.96295534	0.16797129	28.42853314	0.194705	-1.75472882
82	20.168759	0.1835473	24.20537909	0.21221335	-5.72313641
83	20.37456267	0.19781907	19.69541781	0.22814119	-9.98222628
84	20.58036633	0.21066793	14.97845322	0.24236619	-14.45211616
85	20.78616999	0.22199574	10.10726466	0.25479021	-19.07995015
86	20.99197366	0.23171772	5.11775674	0.26533063	-23.82974884
87	21.19777732	0.23975809	0.03530313	0.27391525	-28.67606545

88	21.40358098	0.24604817	-5.12108875	0.28047997	-33.59982116
89	21.60938465	0.2505267	-10.33595102	0.2849691	-38.5854783
90	21.81518831	0.25314191	-15.59540916	0.28733752	-43.61909419
91	22.02099197	0.25385469	-20.88584629	0.28755431	-48.68698533
92	22.22679564	0.25264241	-26.19299466	0.28560676	-53.77481892
93	22.4325993	0.24950235	-31.50130768	0.28150424	-58.86698478
94	22.63840296	0.24445449	-36.79347394	0.27528104	-63.94610938
95	22.84420663	0.23754299	-42.04992508	0.26699787	-68.99256369
96	23.05001029	0.22883635	-47.24816247	0.25674182	-73.98378978
97	23.25581395	0.21842617	-52.36167304	0.24462481	-78.89321666
98	23.46161762	0.20642517	-57.35810484	0.23078116	-83.68843578
99	23.66742128	0.19296471	-62.19618214	0.21536474	-88.3281161
100	23.87322494	0.17819306	-66.82047266	0.19854692	-92.75677132
101	24.07902861	0.1622753	-71.15238083	0.18051637	-96.89575307
102	24.28483227	0.14539674	-75.07419425	0.16148284	-100.6272974
103	24.49063593	0.12777303	-78.39961867	0.14168819	-103.7650595
104	24.6964396	0.10967336	-80.81649016	0.12143201	-105.9968263
105	24.90224326	0.09147303	-81.76941505	0.10112933	-106.767156
106	25.10804692	0.0737783	-80.21286632	0.08144767	-105.0304745
107	26.3428689	0.0767598	-2.02992454	0.08405293	-25.8159427
108	26.54867257	0.09388216	-1.25671337	0.10267292	-24.87860442
109	26.75447623	0.11110913	-2.67709869	0.12136337	-26.13698485
110	26.96027989	0.12790871	-5.3910578	0.13954489	-28.69102294
111	27.16608356	0.14395016	-8.91246122	0.15686012	-32.05455171
112	27.37188722	0.15900483	-12.96304457	0.17306437	-35.94927008
113	27.57769088	0.17290318	-17.37462241	0.18797814	-40.20695676
114	27.78349455	0.18551372	-22.04087063	0.20146392	-44.72125257
115	27.98929821	0.19673124	-26.89211791	0.21341308	-49.42245186
116	28.19510187	0.20646934	-31.88131005	0.22373762	-54.26346688
117	28.40090554	0.21465537	-36.975679	0.23236466	-59.21149675
118	28.6067092	0.22122739	-42.1514784	0.23923293	-64.24276299
119	28.81251286	0.22613272	-47.39046405	0.24429121	-69.33899001
120	29.01831653	0.22932816	-52.67743693	0.24749852	-74.48494801
121	29.22412019	0.23078152	-57.99848482	0.24882571	-79.66669471
122	29.42992385	0.23047428	-63.3397176	0.24825825	-84.87031056
123	29.63572752	0.22840466	-68.68636531	0.24579952	-90.08099679
124	29.84153118	0.22459065	-74.02213659	0.24147389	-95.28243386
125	30.04733484	0.21907226	-79.3287364	0.23532917	-100.4562991
126	30.25313851	0.21191269	-84.58542368	0.22743771	-105.5818246
127	30.45894217	0.20319795	-89.76845159	0.21789589	-110.6352368
128	30.66474583	0.1930349	265.1498349	0.20682198	-115.5888551
129	30.8705495	0.18154813	260.2025883	0.19435266	-120.4095014
130	31.07635316	0.16887593	255.4312964	0.18063874	-125.0556633
131	31.28215682	0.15516655	250.8908411	0.16584109	-129.4724345
132	31.48796049	0.14057588	246.6585734	0.1501281	-133.5824402

133	31.69376415	0.12526847	242.8509403	0.13367686	-137.2692102
134	31.89956781	0.10942518	239.6551013	0.11668123	-140.3455621
135	32.10537148	0.09326386	237.3922325	0.09937388	-142.4902975
136	32.31117514	0.07708918	236.6519078	0.0820792	-143.1138206
137	33.95760445	0.08477178	-39.46100412	0.08976943	-58.33778066
138	34.16340811	0.10045213	-41.42047966	0.10630731	-60.19152617
139	34.36921177	0.11565816	-44.58064048	0.12232398	-63.24709277
140	34.57501544	0.1300858	-48.49383236	0.13749948	-67.05680874
141	34.7808191	0.14350903	-52.90055405	0.15159698	-71.36115563
142	34.98662276	0.15575336	-57.63994231	0.1644346	-75.99925337
143	35.19242643	0.16668488	-62.60665519	0.17587358	-80.86574351
144	35.39823009	0.17620458	-67.72882125	0.18581223	-85.8887384
145	35.60403375	0.1842442	-72.95608502	0.19418142	-91.01786671
146	35.80983742	0.19076198	-78.25272234	0.20093994	-96.21738869
147	36.01564108	0.19573788	-83.59338294	0.20606955	-101.4619388
148	36.22144474	0.1991687	-88.96021241	0.20956958	-106.7336476
149	36.42724841	0.20106324	265.6593047	0.21145197	-112.0199851
150	36.63305207	0.20143838	260.2741277	0.211737	-117.3119773
151	36.83885573	0.20031632	254.8912423	0.21045047	-122.6026247
152	37.04465939	0.19772345	249.5171185	0.20762241	-127.8854432
153	37.25046306	0.19369066	244.1590743	0.20328746	-133.153101
154	37.45626672	0.18825504	238.826564	0.19748662	-138.3961309
155	37.66207038	0.18146238	233.5324329	0.1902699	-143.6016741
156	37.86787405	0.17337001	228.294239	0.18169922	-148.7521598
157	38.07367771	0.16404927	223.1358347	0.17185102	-153.8237231
158	38.27948137	0.15358733	218.0895648	0.16081811	-158.7840066
159	38.48528504	0.142088	213.1997204	0.14871054	-163.5887073
160	38.6910887	0.12967191	208.5284259	0.13565567	-168.1756885
161	38.89689236	0.11647653	204.1662526	0.12179825	-172.4543675
162	39.10269603	0.10265782	200.2522956	0.10730206	-176.2856374
163	39.30849969	0.08839654	197.0142653	0.0923565	-179.4417767
164	39.51430335	0.07391695	194.8538868	0.07719606	178.4789509
165	41.36653632	0.076157	-77.81142283	0.07925829	-93.48998674
166	41.57233999	0.08930473	-80.53114124	0.0929079	-96.13587887
167	41.77814365	0.10189074	-84.17154682	0.10596401	-99.70313313
168	41.98394731	0.11371456	-88.40069761	0.11821904	-103.8597986
169	42.18975098	0.12461843	266.9771198	0.12951003	-108.410153
170	42.39555464	0.13447555	262.0862632	0.13970641	-113.2298299
171	42.6013583	0.1431867	257.0107906	0.14870639	-118.2347628
172	42.80716197	0.1506795	251.8101838	0.15643612	-123.3654614
173	43.01296563	0.15690774	246.5276486	0.16284901	-128.5787118
174	43.21876929	0.16184968	241.194649	0.16792387	-133.8430418
175	43.42457296	0.16550476	235.8335009	0.17166146	-139.1361275
176	43.63037662	0.16788887	230.4590093	0.17407958	-144.4431563
177	43.83618028	0.16902862	225.0797169	0.17520706	-149.7555776

178	44.04198395	0.16895533	219.6991024	0.17507756	-155.0699051
179	44.24778761	0.1676997	214.3169179	0.17372401	-160.3863794
180	44.45359127	0.1652879	208.9307453	0.17117462	-165.7074111
181	44.65939494	0.16173988	203.5377709	0.16745104	-171.0358069
182	44.8651986	0.15707009	198.1367218	0.16256923	-176.3728325
183	45.07100226	0.15129062	192.7299016	0.15654263	178.2838227
184	45.27680593	0.1444162	187.3253052	0.14938738	172.9421604
185	45.48260959	0.13647027	181.9389023	0.14112861	167.618157
186	45.68841325	0.12749128	176.597375	0.13180687	162.3385013
187	45.89421692	0.11753822	171.3419341	0.12148391	157.1444107
188	46.10002058	0.10669482	166.234478	0.11024695	152.0977899
189	46.30582424	0.09507232	161.3686987	0.09821152	147.2923372
190	46.51162791	0.08281139	156.8918827	0.0855234	142.8753455
191	46.71743157	0.07008562	153.0512855	0.0723622	139.0940762
192	48.98127187	0.07609841	242.6151554	0.07836366	-130.7205444
193	49.18707553	0.08638181	238.5414865	0.08893341	-134.740397
194	49.39287919	0.0960965	234.0397937	0.09891334	-139.1886982
195	49.59868286	0.10515937	229.2208198	0.10821839	-143.9547006
196	49.80448652	0.11348111	224.1514806	0.11675718	-148.9714833
197	50.01029018	0.12096555	218.876866	0.12443134	-154.1939519
198	50.21609385	0.12751317	213.4314841	0.13113912	-159.5875933
199	50.42189751	0.133027	207.845086	0.13678145	-165.122652
200	50.62770117	0.1374196	202.1455587	0.14126916	-170.7712363
201	50.83350484	0.14062	196.3601696	0.14453002	-176.5060745
202	51.0393085	0.14257957	190.5158659	0.14651483	177.6997853
203	51.24511216	0.14327614	184.6390405	0.14720159	171.8727401
204	51.45091583	0.14271587	178.7550062	0.14659739	166.0381073
205	51.65671949	0.14093266	172.8873362	0.14473778	160.219464
206	51.86252315	0.13798531	167.0571787	0.14168386	154.4379629
207	52.06832682	0.13395259	161.28265	0.13751714	148.7117241
208	52.27413048	0.12892694	155.578417	0.13233312	143.0554188
209	52.47993414	0.12300748	149.9556148	0.12623404	137.4801861
210	52.68573781	0.11629311	144.422277	0.11932183	131.9940632
211	52.89154147	0.10887669	138.9845114	0.11169217	126.6031622
212	53.09734513	0.100841	133.6487342	0.10343028	121.3139029
213	53.3031488	0.09225694	128.4254433	0.09460916	116.136787
214	53.50895246	0.08318443	123.3354319	0.08529051	111.0926115
215	53.71475612	0.07367581	118.4203845	0.07552815	106.2230645
216	56.59600741	0.07273751	199.7642729	0.07440094	-171.8293345
217	56.80181107	0.08028992	194.3346365	0.08211407	-177.2180964
218	57.00761474	0.08707164	188.7730988	0.089037	177.2609572
219	57.2134184	0.09305062	183.1281027	0.09513732	171.6562719
220	57.41922206	0.09820705	177.4282153	0.10039517	165.9964177
221	57.62502573	0.10252982	171.6893591	0.10479957	160.29732
222	57.83082939	0.10601314	165.9191785	0.10834499	154.5666259

223	58.03663305	0.10865379	160.1199959	0.11102849	148.8066605
224	58.24243672	0.11044923	154.2910075	0.11284785	143.0166229
225	58.44824038	0.11139684	148.4300026	0.11380074	137.1943049
226	58.65404404	0.11149425	142.5347137	0.11388511	131.3374416
227	58.85984771	0.1107407	136.603836	0.11310051	125.444731
228	59.06565137	0.10913905	130.6377283	0.11145021	119.5165342
229	59.27145503	0.10669814	124.6388137	0.10894356	113.5552772
230	59.4772587	0.10343508	118.6117135	0.10559835	107.5655835
231	59.68306236	0.09937703	112.563163	0.1014426	101.5541909
232	59.88886602	0.09456225	106.5017745	0.09651567	95.52971427
233	60.09466969	0.0890403	100.4377279	0.09086839	89.50233588
234	60.30047335	0.08287116	94.38248732	0.08456222	83.48352212
235	60.50627701	0.07612361	88.34868366	0.07766755	77.48590633
236	64.62235028	0.07166933	143.1152537	0.0729626	132.9294117
237	64.82815394	0.07501405	136.958325	0.07636011	126.8041451
238	65.0339576	0.07766422	130.8246518	0.07905007	120.7019398
239	65.23976127	0.07963005	124.7236119	0.08104309	114.6321755
240	65.44556493	0.08093353	118.6598255	0.08236177	108.5994739
241	65.65136859	0.08160536	112.6324743	0.08303752	102.6030186
242	65.85717226	0.08168089	106.6348433	0.08310651	96.63609624
243	66.06297592	0.08119588	100.654259	0.08260529	90.68603491
244	66.26877958	0.08018234	94.67254251	0.08156658	84.73465759
245	66.47458325	0.07866531	88.66701715	0.08001599	78.75928908
246	66.68038691	0.07666107	82.61198743	0.07797022	72.73423554
247	66.88619057	0.07417716	76.48049008	0.07543707	66.63253532
248	67.09199424	0.07121423	70.24601695	0.07241733	60.42768185

Tabla 82: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente de los cables enterrados en el vial del campus.

Armónico	Frecuencia	Módulo medido	Fase medida(°)	Módulo real	Fase real (°)
1	2	0.01591287	81.50638689	0.18582054	-3.56133376
2	4	0.02964955	118.3538768	0.17502348	38.14639853
3	6	0.0753256	26.74535725	0.30174691	-48.73983283
4	8	0.04457736	-61.4950621	0.13716202	-132.4508405
5	10	0.06053997	-22.50654477	0.15342002	-89.16688056
6	12	0.11574601	247.3498037	0.25273541	-175.2756742
7	14	0.05609298	162.3863233	0.10891754	103.5218483
8	16	0.07863254	202.4476482	0.13895746	147.0681613
9	18	0.13359585	112.9548868	0.21866671	60.79066354
10	20	0.05722917	30.98592389	0.08794592	-18.2206084
11	22	0.08744934	71.18423886	0.1275273	24.6936172
12	24	0.1370046	-18.04307533	0.19121679	-62.04188159
13	26	0.05301435	262.02694	0.07130226	-139.6858451
14	28	0.09036041	-57.50104751	0.11776679	-97.11556174
15	30	0.13273922	212.9194875	0.16840549	175.2327263
16	32	0.04688028	135.4701004	0.05811527	99.55667698
17	34	0.08968308	175.1773783	0.10897013	140.8976963
18	36	0.12479417	85.27284791	0.14901136	52.5008037
19	38	0.03978254	10.0588614	0.04678392	-21.31945504
20	40	0.08663419	48.88484813	0.10052548	18.79731288
21	42	0.11412999	-41.73330728	0.13087376	-70.62318382
22	44	0.03256614	245.1101906	0.03695462	-142.6663649
23	46	0.08156519	-76.8719577	0.09169763	-103.6116824
24	48	0.10241912	191.6687821	0.11418717	165.8964047
25	50	0.02592401	121.2385587	0.02868771	96.3703036
26	52	0.07552629	157.7403229	0.08301856	133.7185582
27	54	0.09033491	65.47144202	0.09869623	42.24353959
28	56	0.01950591	-1.96472784	0.02119477	-24.44691433
29	58	0.06870982	32.85497312	0.07428796	11.07437617
30	60	0.07815387	-60.61175246	0.08411652	-81.73127508
31	62	0.01408861	235.3496973	0.01510087	-145.1460169
32	64	0.06139806	267.9227177	0.06556085	-111.9835254
33	66	0.06694662	173.388541	0.07123785	154.0400759
34	68	0.00978084	114.6317691	0.01037462	95.81178004
35	70	0.05437975	143.2249348	0.05751178	124.9062866
36	72	0.05650873	47.7022806	0.05960145	29.85980456
37	74	0.00605247	-1.60306911	0.00636772	-18.99275395
38	76	0.04737838	18.90344738	0.04973039	1.94480099
39	78	0.04695458	-78.05860041	0.0491793	-94.60647577
40	80	0.00327682	246.9080704	0.0034252	-129.2479441
41	82	0.04071914	254.4050202	0.04248346	-121.3768016
42	84	0.03858665	155.9829432	0.04018845	140.5587849

43	88	0.0347209	130.3940808	0.03604842	115.6397592
44	90	0.0311922	30.78621741	0.03233861	16.3459154
45	94	0.02913126	6.64558522	0.0301236	-7.204387
46	96	0.02468989	265.2696237	0.02550076	-108.3025875
47	98	0.00287232	-11.32768501	0.00296335	-24.63285984
48	100	0.02421904	242.636296	0.02496039	-130.4119689
49	102	0.01962493	140.1208274	0.02020562	127.3199018
50	104	0.00345572	228.9990725	0.00355465	-143.5635684
51	106	0.02018192	119.2344087	0.0207413	106.9014785
52	108	0.01524131	16.14558984	0.01565063	4.0342439
53	110	0.00371326	108.7300604	0.00380996	96.83258971
54	112	0.01637283	-3.44187818	0.01678656	-15.13279288
55	114	0.01169569	251.3123737	0.01198267	-120.17894
56	116	0.00358835	-10.46169928	0.0036739	-21.76002598
57	118	0.01328029	233.9338925	0.01358814	-137.1777422
58	120	0.0090488	127.7941	0.00925288	116.8631619
59	122	0.00359177	226.1861969	0.00367063	-144.5697596
60	124	0.01091197	112.506207	0.01114532	101.9197812
61	126	0.00666232	5.60305874	0.00680118	-4.8190394
62	128	0.00361211	106.4426381	0.00368552	96.17989786
63	130	0.00880371	-7.8469067	0.00897828	-17.95503892
64	132	0.0048692	241.2236724	0.00496345	-128.7343948
65	134	0.00334018	-14.80538804	0.00340333	-24.6177376
66	136	0.00711493	231.0696825	0.00724637	-138.6011126
67	138	0.00358762	122.0140441	0.00365241	112.4808147
68	140	0.00324647	220.3583897	0.00330381	-149.0410982
69	142	0.00610729	112.6181602	0.00621285	103.3487455
70	146	0.00317088	97.67405304	0.00322342	88.65436271
71	148	0.00495196	-5.80844228	0.00503235	-14.70820905
72	154	0.00420973	232.9807849	0.00427416	-135.5774738
73	160	0.0036098	117.588115	0.00366206	109.3462982
74	166	0.00303176	1.7558323	0.00307341	-6.19196413
75	168	0.0022595	125.32024	0.00229002	117.4658723

Tabla 83: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente de los cables enterrados en el vial del campus ampliada por 10.

Armónico	Frecuencia	Módulo medido	fase medida (°)	Módulo real	Fase real(°)
1	2	0.15842457	81.50638689	1.84998303	-3.56133376
2	4	0.29518352	118.3538768	1.7424901	38.14639854
3	6	0.74992293	26.74535725	3.00411716	-48.73983283
4	8	0.44380106	-61.4950621	1.36555085	-132.4508405
5	10	0.60272084	-22.50654477	1.52741142	-89.16688056
6	12	1.15233843	247.3498037	2.51617078	-175.2756742
7	14	0.55844768	162.3863233	1.08435576	103.5218483
8	16	0.78284593	202.4476482	1.38342576	147.0681613
9	18	1.33004694	112.9548868	2.17699124	60.79066353
10	20	0.5697593	30.98592389	0.87556759	-18.2206084
11	22	0.8706238	71.18423886	1.26962991	24.69361719
12	24	1.36398358	-18.04307533	1.90370665	-62.0418816
13	26	0.52779763	262.02694	0.70986753	-139.6858451
14	28	0.89960566	-57.50104751	1.17245672	-97.11556174
15	30	1.3215186	212.9194875	1.67660307	175.2327263
16	32	0.46672841	135.4701004	0.57858115	99.55667698
17	34	0.8928624	175.1773783	1.0848795	140.8976963
18	36	1.24241959	85.27284791	1.48351992	52.5008037
19	38	0.39606508	10.0588614	0.46576903	-21.31945504
20	40	0.86250836	48.88484813	1.00080657	18.79731288
21	42	1.13624968	-41.73330728	1.3029465	-70.62318383
22	44	0.32422035	245.1101906	0.36791097	-142.6663648
23	46	0.81204272	-76.8719577	0.91291875	-103.6116824
24	48	1.01965926	191.6687821	1.136819	165.8964047
25	50	0.25809297	121.2385587	0.2856077	96.3703036
26	52	0.75192095	157.7403229	0.82651211	133.7185582
27	54	0.89935186	65.47144202	0.9825951	42.24353959
28	56	0.19419593	-1.96472784	0.21100979	-24.44691433
29	58	0.68405783	32.85497312	0.73959243	11.07437616
30	60	0.77808043	-60.61175246	0.83744313	-81.73127508
31	62	0.14026269	235.3496973	0.15034054	-145.1460168
32	64	0.61126381	267.9227177	0.65270746	-111.9835254
33	66	0.66650386	173.388541	0.70922624	154.0400759
34	68	0.09737558	114.6317691	0.10328715	95.81178005
35	70	0.54139126	143.2249348	0.57257298	124.9062866
36	72	0.56258678	47.7022806	0.59337708	29.85980455
37	74	0.06025691	-1.60306911	0.06339549	-18.99275395
38	76	0.4716873	18.90344738	0.49510335	1.94480099
39	78	0.46746807	-78.05860041	0.48961685	-94.60647577
40	80	0.03262317	246.9080704	0.03410037	-129.2479441
41	82	0.40538957	254.4050202	0.42295468	-121.3768016

42	84	0.38415903	155.9829432	0.40010614	140.5587849
43	88	0.34567263	130.3940808	0.35888907	115.6397592
44	90	0.31054177	30.78621741	0.32195514	16.3459154
45	94	0.2900236	6.64558522	0.29990312	-7.20438701
46	96	0.24580639	265.2696237	0.25387921	-108.3025875
47	98	0.02859611	-11.32768501	0.02950239	-24.63285984
48	100	0.24111873	242.636296	0.24849941	-130.4119689
49	102	0.1953809	140.1208274	0.20116215	127.3199018
50	104	0.0344043	228.9990725	0.03538918	-143.5635684
51	106	0.20092612	119.2344087	0.20649512	106.9014785
52	108	0.15173869	16.14558984	0.15581379	4.0342439
53	110	0.03696834	108.7300604	0.03793104	96.83258971
54	112	0.16300382	-3.44187818	0.16712281	-15.13279288
55	114	0.11643936	251.3123737	0.11929642	-120.17894
56	116	0.0357247	-10.46169928	0.03657643	-21.76002598
57	118	0.13221523	233.9338925	0.13528011	-137.1777422
58	120	0.09008755	127.7941	0.09211927	116.8631619
59	122	0.03575873	226.1861969	0.0365438	-144.5697596
60	124	0.1086369	112.506207	0.11096011	101.9197812
61	126	0.0663284	5.60305874	0.06771082	-4.8190394
62	128	0.03596128	106.4426381	0.03669216	96.17989786
63	130	0.08764751	-7.8469067	0.08938552	-17.95503892
64	132	0.04847657	241.2236724	0.04941494	-128.7343948
65	134	0.03325402	-14.80538804	0.0338827	-24.6177376
66	136	0.0708345	231.0696825	0.07214305	-138.6011126
67	138	0.03571743	122.0140441	0.03636247	112.4808147
68	140	0.03232102	220.3583897	0.03289192	-149.0410982
69	142	0.0608027	112.6181602	0.06185361	103.3487455
70	146	0.03156849	97.67405304	0.03209159	88.6543627
71	148	0.04930047	-5.80844228	0.05010086	-14.70820905
72	152	0.02838865	-25.95395823	0.02883161	-34.62312565
73	154	0.04191106	232.9807849	0.04255253	-135.5774738
74	160	0.03593825	117.588115	0.03645855	109.3462982
75	166	0.03018344	1.7558323	0.03059809	-6.19196413

Tabla 84: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente de los cables enterrados en el vial del campus distancia de seguridad 50km/h.

Armónico	Frecuencia	Módulo medido	fase medida (°)	Módulo real	Fase real(°)
1	0.25826446	0.01122083	243.0475545	1.0110004	153.6860223
2	0.51652893	0.01052935	216.193776	0.47443709	127.470553
3	0.77479339	0.00942281	189.5475942	0.28313979	101.4623637
4	1.03305785	0.00796807	163.2450426	0.17964838	75.79732994
5	1.29132231	0.00625451	137.4890696	0.11287442	50.67824301
6	1.54958678	0.00438962	112.6791274	0.06606074	26.50439897
7	2.84090909	0.00326163	167.7826229	0.02691412	84.77119411
8	3.09917355	0.00387503	150.2318778	0.02935231	67.84862048
9	3.35743802	0.00419528	135.3724052	0.02937837	53.61548275
10	3.61570248	0.00437192	124.0934679	0.02847511	42.96090286
11	3.87396694	0.00462353	116.0423747	0.02815567	35.53205142
12	4.1322314	0.00513924	108.9244152	0.02939506	29.03408277
13	4.39049587	0.00594952	99.96958248	0.03209145	20.69685786
14	4.64876033	0.00692232	88.09658478	0.03533821	9.43895585
15	4.90702479	0.0078651	73.76428054	0.03812177	-4.28089034
16	5.16528926	0.00860344	57.8777857	0.03970716	-19.55768688
17	5.42355372	0.009013	41.26596641	0.03971251	-35.56268613
18	5.68181818	0.00903014	24.60804716	0.03807551	-51.61677841
19	5.94008264	0.00865385	8.49199041	0.03499429	-67.13211229
20	6.19834711	0.00794064	-6.51708552	0.03085643	-81.5436766
21	6.45661157	0.00699142	-19.83182601	0.02615512	-94.26421995
22	6.71487603	0.00592924	-30.83743551	0.02139092	-104.679046
23	6.9731405	0.00486838	-38.92006245	0.01696443	-112.1743984
24	7.23140496	0.00388326	-43.38157916	0.0130892	-116.0522405
25	7.48966942	0.00300529	-42.71361117	0.00981204	-114.804285
26	8.52272727	0.00432454	14.34747952	0.01257967	-55.46171019
27	8.78099174	0.006085	8.54958097	0.0172429	-60.69921727
28	9.0392562	0.00794138	-1.78477437	0.02194206	-70.47730384
29	9.29752066	0.00971628	-14.35223855	0.02620006	-82.49268035
30	9.55578512	0.01126556	-27.98721949	0.02967189	-95.57980909
31	9.81404959	0.01248538	-42.01104237	0.0321465	-109.0600657
32	10.07231405	0.01332079	-55.98681284	0.03355326	-122.4966025
33	10.33057851	0.01376712	-69.62818019	0.03394978	-135.6031114
34	10.58884298	0.0138604	-82.77259522	0.03348577	-148.2170824
35	10.84710744	0.01365747	264.6212969	0.03234695	-160.2971959
36	11.1053719	0.01321043	252.4828115	0.03069254	-171.9141685
37	11.36363636	0.01254458	240.6713246	0.028608	176.7913476
38	11.62190083	0.01165036	229.061542	0.02609379	165.6940334
39	11.88016529	0.01049398	217.6626281	0.02309643	154.8030317
40	12.13842975	0.00904319	206.7772029	0.01956875	144.4209442
41	12.39669421	0.00730041	197.3154966	0.01553985	135.4579863
42	12.65495868	0.00534843	191.7863449	0.01120456	130.4229812

43	12.91322314	0.00348664	198.069282	0.00719198	137.1954542
44	13.42975207	0.00409125	255.3187939	0.0081926	-164.5898164
45	13.68801653	0.00622303	256.6268902	0.01228584	-162.8060427
46	13.94628099	0.00840631	249.456503	0.01636889	-169.5053721
47	14.20454545	0.01041542	239.3447417	0.02001101	-179.1506909
48	14.46280992	0.01216993	228.1145715	0.02307916	170.0809728
49	14.72107438	0.01364864	216.4499482	0.02555738	158.8735835
50	14.97933884	0.01485548	204.5900571	0.02747635	147.4663376
51	15.23760331	0.01579447	192.5703573	0.02886474	135.8947071
52	15.49586777	0.01645225	180.3441293	0.02971786	124.1119878
53	15.75413223	0.01679267	167.8620018	0.02999001	112.0688252
54	16.01239669	0.01676457	155.1225671	0.0296104	99.76383026
55	16.27066116	0.01631851	142.1975283	0.02851367	87.2687267
56	16.52892562	0.01542531	129.2412297	0.0266716	74.73788082
57	16.78719008	0.01409036	116.5010213	0.02411557	62.41866599
58	17.04545455	0.01236029	104.3514558	0.02094489	50.68566004
59	17.30371901	0.01032257	93.39622946	0.01732294	40.1425856
60	17.56198347	0.00810379	84.76030174	0.01347141	31.91442966
61	17.82024793	0.0058857	80.97593159	0.00969431	28.53347998
62	18.0785124	0.00401102	88.45172159	0.00654738	36.40836909
63	18.33677686	0.00328934	114.8111369	0.00532246	63.1625931
64	18.59504132	0.00428876	137.467842	0.0068805	86.20984837
65	18.85330579	0.00614451	142.1817487	0.00977576	91.31007958
66	19.11157025	0.00822012	138.0141921	0.01297195	87.52465543
67	19.36983471	0.01030087	129.9338248	0.01612686	79.82226291
68	19.62809917	0.01228101	119.7940511	0.0190784	70.05634164
69	19.88636364	0.01407158	108.3882007	0.02169516	59.02025685
70	20.1446281	0.01558403	96.14292075	0.02385009	47.14069217
71	20.40289256	0.01673639	83.34833768	0.0254295	34.70781084
72	20.66115702	0.01746512	70.23696167	0.02635038	21.95416041
73	20.91942149	0.01773527	57.00948374	0.02657442	9.08046968
74	21.17768595	0.01754491	43.84107807	0.02611301	-3.73804903
75	21.43595041	0.01692246	30.8809716	0.02502167	-16.3521303
76	21.69421488	0.01591766	18.25219015	0.02338538	-28.63870956
77	21.95247934	0.01458885	6.05918102	0.02129914	-40.4933005
78	22.2107438	0.01299072	-5.58381753	0.01885002	-51.80162569
79	22.46900826	0.01116765	-16.47865452	0.01610786	-62.36549478
80	22.72727273	0.00915747	-26.16113942	0.01313128	-71.72067776
81	22.98553719	0.00701222	-33.40153492	0.00999768	-78.63739776
82	23.24380165	0.00486259	-34.53246029	0.00689412	-79.44823444
83	23.50206612	0.00318225	-18.27784562	0.0044871	-62.87707823
84	23.76033058	0.00328476	17.67801226	0.0046069	-26.60818634
85	24.01859504	0.00514089	31.96889766	0.00717244	-12.00773485
86	24.2768595	0.00747792	29.49025688	0.01037964	-14.18023794
87	24.53512397	0.00980497	21.02947063	0.01354156	-22.33827545

88	24.79338843	0.01193504	10.17040482	0.01640264	-32.89794213
89	25.05165289	0.01376911	-1.75363292	0.01883253	-44.52589114
90	25.30991736	0.01525363	-14.14592444	0.02076507	-56.62536529
91	25.56818182	0.01636686	-26.71314285	0.02217817	-68.90299882
92	25.82644628	0.0171077	-39.31681853	0.02307779	-81.22028342
93	26.08471074	0.01748374	-51.90829889	0.02348118	-93.52852805
94	26.34297521	0.01750063	-64.48774982	0.02340249	-105.8278603
95	26.60123967	0.01715621	-77.06866611	0.022845	-118.1317371
96	26.85950413	0.01644157	-89.64394101	0.02180282	-130.4330138
97	27.1177686	0.01534845	257.8468624	0.02027075	-142.671216
98	27.37603306	0.01388013	245.5539662	0.01825874	-154.6960846
99	27.63429752	0.01206246	233.7765615	0.01580593	-166.2083912
100	27.89256198	0.00995306	223.1007923	0.01299216	-176.6219557
101	28.15082645	0.00765263	214.7976531	0.00995199	175.3342531
102	28.40909091	0.00534271	212.1630926	0.00692257	172.9562198
103	28.66735537	0.00347287	224.7231945	0.00448366	-174.2299364
104	28.92561983	0.00320585	258.7104706	0.00412435	-139.9916683
105	29.1838843	0.00475192	-83.1156842	0.00609228	-121.569546
106	29.44214876	0.00685922	-82.92740167	0.00876424	-121.1356666
107	29.70041322	0.00900095	-89.46901042	0.01146263	-127.4343245
108	29.95867769	0.01102148	261.2518957	0.0139901	-136.4730795
109	30.21694215	0.01285213	250.6095788	0.01626177	-146.8776361
110	30.47520661	0.0144426	239.1494993	0.01821699	-158.1025004
111	30.73347107	0.0157423	227.1261587	0.01979537	-169.8931383
112	30.99173554	0.0166983	214.6921784	0.02093424	177.9031043
113	31.25	0.01726141	201.9720647	0.02157622	165.4107656
114	31.50826446	0.01739532	189.0905199	0.02168053	152.7545799
115	31.76652893	0.01708488	176.1815699	0.02123301	140.0686041
116	32.02479339	0.01634066	163.3908192	0.02025134	127.4984741
117	32.28305785	0.01519836	150.87834	0.01878402	115.2042925
118	32.54132231	0.01371363	138.829972	0.01690337	103.3719294
119	32.79958678	0.01195394	127.4916052	0.01469545	92.24730451
120	33.05785124	0.00999151	117.2630757	0.01225109	82.23028359
121	33.3161157	0.00790325	108.960448	0.00966588	74.13696018
122	33.57438017	0.00579262	104.6244921	0.0070668	70.00813323
123	33.83264463	0.00389272	110.1738533	0.00473731	75.76247627
124	34.09090909	0.00294587	137.0582285	0.00357638	102.8497144
125	34.34917355	0.00385371	164.6828918	0.00466744	130.6751492
126	34.60743802	0.0057823	170.445001	0.00698694	136.6359659
127	34.86570248	0.00793289	165.6728244	0.00956365	132.0604599
128	35.12396694	0.01002244	156.6856068	0.01205559	123.2679023
129	35.3822314	0.01191318	145.7437703	0.01429823	112.5187418
130	35.64049587	0.01351588	133.8031238	0.0161866	100.768813
131	35.89876033	0.01477188	121.347905	0.01765306	88.50237897
132	36.15702479	0.0156494	108.6558806	0.01866253	75.99723185

133	36.41528926	0.01614026	95.89430771	0.01920826	63.42065354
134	36.67355372	0.01625392	83.15994138	0.01930434	50.86942358
135	36.93181818	0.01600941	70.50118074	0.0189761	38.39196529
136	37.19008264	0.01542761	57.93782568	0.0182507	26.00810238
137	37.44834711	0.01452628	45.48551889	0.01715137	13.73350105
138	37.70661157	0.01331982	33.18878199	0.01569712	1.6127061
139	37.96487603	0.01182381	21.16902291	0.01390819	-10.23285169
140	38.2231405	0.01006321	9.70925913	0.01181555	-21.52013231
141	38.48140496	0.00808291	-0.5475898	0.00947334	-31.606194
142	38.73966942	0.00596554	-7.99080577	0.00697937	-38.88029674
143	38.99793388	0.00389162	-7.68585948	0.00454506	-38.40788965
144	39.51446281	0.00300387	54.03569579	0.00349633	23.64371477
145	39.77272727	0.00481146	63.09897358	0.00559098	32.86962256
146	40.03099174	0.00681249	58.67416678	0.0079033	28.60587666
147	40.2892562	0.00871948	49.81021504	0.01009939	19.9014368
148	40.54752066	0.01043992	39.15576957	0.012073	9.404974
149	40.80578512	0.01193194	27.63984796	0.01377696	-1.95447464
150	41.06404959	0.0131701	15.63348035	0.0151833	-13.80585973
151	41.32231405	0.01413209	3.29387705	0.01626781	-25.99195202
152	41.58057851	0.01479333	-9.30441707	0.01700372	-38.43818793
153	41.83884298	0.01512722	-22.10888339	0.01736213	-51.09203045
154	42.09710744	0.01510987	-35.05863416	0.01731728	-63.89257366
155	42.3553719	0.01472672	-48.06954469	0.01685429	-76.75567501
156	42.61363636	0.01397892	-61.02661089	0.01597616	-89.56631276
157	42.87190083	0.01288698	-73.77620068	0.01470801	-102.1708375
158	43.13016529	0.01149103	-86.10851494	0.01309707	-114.3594329
159	43.38842975	0.00984786	262.2891087	0.01120932	-125.8194198
160	43.64669421	0.00802721	251.9605968	0.00912498	-136.006855
161	43.90495868	0.00611292	244.066343	0.00693993	-143.7613285
162	44.16322314	0.00422946	241.7166039	0.00479555	-145.9725675
163	44.93801653	0.00373836	-49.23999847	0.00422305	-76.5211929
164	45.19628099	0.00552595	-49.01462248	0.00623493	-76.16228088
165	45.45454545	0.00736788	-55.92292975	0.00830337	-82.93825507
166	45.71280992	0.00911505	-65.78390406	0.01026043	-92.66808445
167	45.97107438	0.01068063	-77.12080563	0.01200896	-103.8750147
168	46.22933884	0.01199787	-89.27896801	0.01347479	-115.9043649
169	46.48760331	0.01301509	258.0986398	0.01460095	-128.39909
170	46.74586777	0.01369789	245.2404666	0.01535008	-141.1307273
171	47.00413223	0.01403115	232.3071919	0.01570653	-153.9385834
172	47.26239669	0.01401821	219.4149875	0.01567532	-166.706473
173	47.52066116	0.01367699	206.6458686	0.01527768	-179.3523677
174	47.77892562	0.01303395	194.0563591	0.0145443	168.1802699
175	48.03719008	0.01211801	181.6918685	0.0135084	155.9368619
176	48.29545455	0.01095635	169.6140882	0.01220115	143.9791128
177	48.55371901	0.00957402	157.9533283	0.01065118	132.437345

178	48.81198347	0.00799807	147.0176045	0.0088892	121.6195868
179	49.07024793	0.00626711	137.5698243	0.00695866	112.288758
180	49.3285124	0.00445341	131.743409	0.00494011	106.5782917
181	50.10330579	0.00295253	203.7433218	0.0032661	178.9201566
182	50.36157025	0.00465813	206.2658699	0.00514819	-178.4452379
183	50.61983471	0.00640104	199.4333127	0.00706818	174.8333179
184	50.87809917	0.00801109	189.4010562	0.00883827	164.911241
185	51.13636364	0.00941938	178.0332579	0.01038297	153.6526997
186	51.3946281	0.01059169	166.0385451	0.01166523	141.7663323
187	51.65289256	0.0115112	153.7207314	0.01266725	129.5559628
188	51.91115702	0.01216942	141.209805	0.01338044	117.1515899
189	52.16942149	0.01255993	128.5550377	0.01379847	104.6024957
190	52.42768595	0.01267508	115.7741239	0.01391369	91.92638492
191	52.68595041	0.01250632	102.8846069	0.01371745	79.14081062
192	52.94421488	0.01204753	89.92550487	0.01320381	66.28480099
193	53.20247934	0.01130015	76.97320504	0.01237505	53.43475293
194	53.4607438	0.01027787	64.15737822	0.01124688	40.72034688
195	53.71900826	0.00900961	51.68854768	0.00985156	28.35211557
196	53.97727273	0.00754001	39.92551736	0.00823844	16.68887225
197	54.23553719	0.00592893	29.56882649	0.00647334	6.43116537
198	54.49380165	0.00425608	22.31608328	0.00464349	-0.72338781
199	55.5268595	0.00358814	99.92852885	0.00390369	77.27405543
200	55.78512397	0.00510198	94.88011996	0.00554684	72.31999853
201	56.04338843	0.0065602	85.73786971	0.00712738	63.27135817
202	56.30165289	0.00789875	74.78575039	0.00857593	52.41211485
203	56.55991736	0.00907213	62.84130194	0.0098434	40.55981663
204	56.81818182	0.0100393	50.27944187	0.0108857	28.08938904
205	57.07644628	0.01076385	37.31929994	0.01166381	15.2199697
206	57.33471074	0.0112178	24.11939493	0.01214797	2.11008521
207	57.59297521	0.01138563	10.810975	0.01232197	-11.10900862
208	57.85123967	0.01126649	-2.49138956	0.01218547	-24.32273391
209	58.10950413	0.01087375	-15.6875008	0.01175348	-37.43088523
210	58.3677686	0.01023191	-28.69041616	0.011053	-50.34651268
211	58.62603306	0.0093718	-41.42069411	0.01011781	-62.99016742
212	58.88429752	0.00832566	-53.78779712	0.00898308	-75.27130477
213	59.14256198	0.00712381	-65.64219098	0.00768184	-87.04038345
214	59.40082645	0.00579464	-76.6534885	0.00624494	-97.96700927
215	59.65909091	0.00437024	-85.95207738	0.00470716	-107.1815631
216	59.91735537	0.00290639	269.2637924	0.00312869	-111.882288
217	60.95041322	0.00405434	-9.11637128	0.00435489	-29.93499585
218	61.20867769	0.00546347	-18.42070838	0.00586535	-39.1589779
219	61.46694215	0.00673968	-29.83365067	0.00723163	-50.49215603
220	61.72520661	0.00783546	-42.14643938	0.00840303	-62.7257653
221	61.98347107	0.008723	-54.8602961	0.00935005	-75.36102118
222	62.24173554	0.00938877	-67.73928426	0.01005857	-88.16198107

223	62.5	0.00982941	-80.6726882	0.01052536	-101.0179234
224	62.75826446	0.01004697	266.3803622	0.01075297	-113.8879721
225	63.01652893	0.01004465	253.4224828	0.01074522	-126.7695055
226	63.27479339	0.00982432	240.4432465	0.01050442	-139.6729452
227	63.53305785	0.0093866	227.4425383	0.01003158	-152.5984003
228	63.79132231	0.00873351	214.4529903	0.00932918	-165.5132333
229	64.04958678	0.00787259	201.5644054	0.00840559	-178.3276357
230	64.30785124	0.00682089	188.9614208	0.00727931	169.1430351
231	64.5661157	0.00560787	177.0097311	0.00598202	157.2644791
232	64.82438017	0.00427754	166.5150343	0.00456086	146.8423995
233	66.11570248	0.00325951	244.5167913	0.00346777	-134.8003242
234	66.37396694	0.00447366	236.4741404	0.00475748	-142.7733493
235	66.6322314	0.00559545	226.004287	0.00594794	-153.1740582
236	66.89049587	0.00659549	214.4269484	0.00700806	-164.6827289
237	67.14876033	0.00745109	202.207171	0.00791393	-176.8343101
238	67.40702479	0.00813942	189.5449724	0.0086415	170.5712202
239	67.66528926	0.00863721	176.5533059	0.0091663	157.6468203
240	67.92355372	0.0089236	163.3222303	0.00946645	144.4825531
241	68.18181818	0.00898418	149.9421908	0.00952696	131.1688685
242	68.44008264	0.00881453	136.5103098	0.00934341	117.8028934
243	68.69834711	0.00842209	123.1298592	0.00892398	104.4879038
244	68.95661157	0.00782563	109.9086031	0.00828881	91.33166842
245	69.21487603	0.00705263	96.96120593	0.00746723	78.44885583
246	69.4731405	0.0061352	84.42455603	0.00649344	65.97635855
247	69.73140496	0.00510606	72.5079099	0.0054022	54.12343726
248	69.98966942	0.00399625	61.64676999	0.00422648	43.32559851
249	71.5392562	0.00353874	135.8259691	0.00373468	117.8759314
250	71.79752066	0.00460372	124.7960089	0.00485697	106.9064176
251	72.05578512	0.00554965	112.4098477	0.00585296	94.58031021
252	72.31404959	0.00634263	99.38610898	0.00668703	81.61623648
253	72.57231405	0.00696001	86.06661594	0.00733551	68.35602317
254	72.83057851	0.00739048	72.64143846	0.00778666	54.98974378
255	73.08884298	0.00763302	59.21886436	0.00803959	41.62568968
256	73.34710744	0.00769417	45.8512299	0.00810139	28.31620063
257	73.6053719	0.00758433	32.54874146	0.0079832	15.07148649
258	73.86363636	0.00731411	19.29313459	0.00769635	1.87328623
259	74.12190083	0.0068921	6.05555904	0.00725002	-11.30724701
260	74.38016529	0.00632481	-7.18062259	0.00665121	-24.4867473
261	74.63842975	0.00561871	-20.39173229	0.00590687	-37.64153332
262	74.89669421	0.00478353	-33.47349132	0.00502733	-50.66732305
263	75.15495868	0.00383559	-46.15647608	0.00402987	-63.29468967
264	76.96280992	0.00365803	20.49907923	0.00383556	3.74062348
265	77.22107438	0.0044706	8.21154743	0.00468627	-8.49398766
266	77.47933884	0.00517271	-4.49997239	0.00542075	-21.15291057
267	77.73760331	0.00575628	-17.45999528	0.00603067	-34.06065742

268	77.99586777	0.00621256	-30.62103641	0.00650694	-47.16974053
269	78.25413223	0.00653058	-43.97432928	0.0068382	-60.4713906
270	78.51239669	0.00669806	-57.50958473	0.00701171	-73.95531569
271	78.77066116	0.00670397	-71.19649241	0.00701606	-87.5912027
272	79.02892562	0.00654195	-84.97859837	0.00684472	-101.322595
273	79.28719008	0.00621319	261.2260282	0.00649906	-115.0675591
274	79.54545455	0.0057279	247.5220279	0.00598992	-128.7214516
275	79.80371901	0.00510494	234.0369379	0.00533711	-142.1567329
276	80.06198347	0.00436959	220.9330584	0.00456718	-155.2111001
277	80.32024793	0.00355033	208.4546039	0.00370995	-167.6403361
278	82.38636364	0.00365468	266.4427668	0.00381171	-109.2687063
279	82.6446281	0.00434696	253.4760495	0.00453271	-122.1887392
280	82.90289256	0.0049231	240.029846	0.00513229	-135.5885279
281	83.16115702	0.00536273	226.3328475	0.00558935	-149.2393791
282	83.41942149	0.00565319	212.5395982	0.00589077	-162.9867463
283	83.67768595	0.00579066	198.7611632	0.00603269	-176.7195621
284	83.93595041	0.00577965	185.0720406	0.0060199	169.6366736
285	84.19421488	0.0056308	171.510091	0.00586359	156.1198237
286	84.45247934	0.00535766	158.0771624	0.00557796	142.7317383
287	84.7107438	0.00497352	144.7453744	0.00517691	129.4445393
288	84.96900826	0.00448939	131.4722548	0.004672	116.2157563
289	85.22727273	0.00391387	118.2264847	0.00407222	103.0140727
290	85.48553719	0.00325478	105.0286987	0.00338576	89.86012521
291	87.55165289	0.00300293	164.6122914	0.00311878	149.785734
292	87.80991736	0.0035624	151.1916789	0.00369913	136.4068162
293	88.06818182	0.00402291	137.7274855	0.00417652	122.9840888
294	88.32644628	0.00438314	124.2633132	0.00454964	109.5611557
295	88.58471074	0.00464309	110.7721063	0.00481855	96.110963
296	88.84297521	0.00480151	97.19621791	0.00498204	82.57586564
297	89.10123967	0.00485491	83.47633705	0.00503651	68.89655434
298	89.35950413	0.00479822	69.57293867	0.0049768	55.03350582
299	89.6177686	0.00462712	55.4787907	0.00479845	40.97948976
300	89.87603306	0.00434076	41.22242702	0.00450068	26.76304178
301	90.13429752	0.0039441	26.86497231	0.00408868	12.44528824
302	90.39256198	0.00344889	12.49415775	0.00357468	-1.88603798
303	93.23347107	0.00323254	36.84105836	0.00334423	22.881653
304	93.49173554	0.00360254	22.64569078	0.00372642	8.72334527
305	93.75	0.00387835	8.27359128	0.00401108	-5.61188677
306	94.00826446	0.00404926	-6.19053831	0.00418717	-20.03933983
307	94.26652893	0.00411029	-20.65673326	0.00424962	-34.46904774
308	94.52479339	0.00406314	-35.04149617	0.00420021	-48.81751164
309	94.78305785	0.00391555	-49.28074193	0.00404702	-63.02064503
310	95.04132231	0.00367943	-63.34231688	0.00380239	-77.04629284
311	95.29958678	0.00336816	-77.23565993	0.00348019	-90.90389256
312	95.55785124	0.00299393	268.9846764	0.00309304	-104.6479953

313	98.65702479	0.0029809	-81.18790231	0.00307429	-94.40759009
314	98.91528926	0.0032069	264.736606	0.00330692	-108.4497731
315	99.17355372	0.00335521	250.8556042	0.00345939	-122.2976307
316	99.43181818	0.00342925	237.0875761	0.00353525	-136.0326778
317	99.69008264	0.00343101	223.3292745	0.0035366	-149.7581606
318	99.94834711	0.00336014	209.4772104	0.00346308	-163.5775668
319	100.2066116	0.00321445	195.4498324	0.0033125	-177.5724467
320	100.464876	0.00299196	181.2025924	0.00308282	168.2126528
321	104.5971074	0.00291172	136.6289509	0.00299427	124.1357679
322	104.8553719	0.00291978	121.9778899	0.0030022	109.5145156

Tabla 85: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente del encendedor comercial.

Armónico	Frecuencia	Módulo medido	fase medida (°)	Módulo real	Fase real(°)
1	1.4450867	0.51275163	-27.64148667	495.3689527	-117.5679468
2	4.3352601	0.82232554	53.98485983	264.8177675	-35.79452161
3	5.7803468	1.28318632	-18.80542832	309.9251568	-108.5112714
4	7.2254335	1.1985425	-83.98422731	231.5867743	-173.6165329
5	10.1156069	1.60289551	258.3538749	221.231048	168.8686402
6	11.5606936	2.47623955	182.8400057	299.0521566	93.42830409
7	13.0057803	1.93812528	102.8330522	208.0605237	13.49488171
8	14.4508671	0.63418266	95.52096543	61.27333327	6.2563239
9	15.8959538	2.29738595	81.28571795	201.7929225	-7.90539706
10	17.3410405	3.40405315	1.5775474	274.0867033	-87.54004376
11	18.7861272	2.53158364	-76.32733207	188.1614929	-165.3714023
12	20.2312139	0.7173565	-82.49008493	49.51063313	-171.4606373
13	21.6763006	2.96051354	262.0871885	190.7118334	173.1901505
14	23.1213873	4.14552439	183.018207	250.3643138	94.19467978
15	24.566474	3.03719466	103.8852056	172.6427877	15.13518525
16	26.0115607	0.81433946	103.3947624	43.71900031	14.7182449
17	27.4566474	3.31841206	83.7518882	168.782412	-4.85113089
18	28.9017341	4.59921538	3.97276774	222.2379242	-84.55675751
19	30.3468208	3.20349564	-76.22054385	147.4293392	-164.6765801
20	31.7919075	0.80645262	-74.37970444	35.42832528	-162.7622568
21	33.2369942	3.51023085	265.4033929	147.5089509	177.0943192
22	34.6820809	4.73351565	183.9218108	190.6338001	95.68621012
23	36.1271676	3.25121844	103.5170228	125.7045454	15.35488931
24	37.5722543	0.71487776	111.6962678	26.57795148	23.60759544
25	39.017341	3.50956113	86.64046746	125.652476	-1.37474996
26	40.4624277	4.61041865	4.83286922	159.1783455	-83.10889983
27	41.9075145	3.07794317	-77.83701721	102.6088017	-165.7053447
28	43.3526012	0.58706944	-59.45058542	18.91957217	-147.2454783
29	44.7976879	3.24057368	268.901191	101.0706566	-178.8202745
30	46.2427746	4.26882686	184.8101316	128.9870004	97.16208597
31	47.6878613	2.74848941	100.4575758	80.53612342	12.88294232
32	49.132948	0.52452682	115.6403949	14.91843612	28.1391655
33	50.5780347	2.73680056	89.06522252	75.61957941	1.63738913
34	52.0231214	3.65533886	5.44694781	98.19958236	-81.90749807
35	53.4682081	2.3220527	-82.02873755	60.69891151	-169.3098046
36	56.3583815	2.37320705	-84.87597387	58.86210971	-172.0103103
37	57.8034682	2.93341983	186.2172791	70.94261966	99.15629398
38	59.2485549	1.75354398	94.82132904	41.37658975	7.83368565
39	62.1387283	1.76822379	100.7345917	39.7878604	13.89360186
40	63.583815	2.07678567	6.59075971	45.67219029	-80.17691883
41	65.0289017	1.22741055	268.427641	26.39501481	-178.2667368
42	67.9190751	1.13981789	-70.26548807	23.47187462	-156.8132971

43	69.3641618	1.22989034	188.2120263	24.80099912	101.7374848
44	70.8092486	0.71546448	72.8812141	14.13417899	-13.52007138
45	72.2543353	0.45850303	267.8433462	8.8774057	-178.4846951
46	73.699422	0.58322251	135.487789	11.07169066	49.23297995
47	75.1445087	0.4099369	9.21723519	7.63308672	-76.96435391
48	78.0346821	0.53500779	99.98047709	9.59463289	13.94529019
49	79.4797688	0.40673248	24.32003203	7.16220891	-61.64197309
50	82.3699422	0.45931426	-26.81261515	7.80576751	-112.6282965
51	83.8150289	0.54855924	-71.73300686	9.16256347	-157.4755467
52	85.2601156	0.71841436	247.217968	11.79739356	161.5485557
53	86.7052023	0.86093358	188.6657715	13.90348891	103.0694727
54	88.150289	0.68650678	130.7741392	10.90594792	45.2509395
55	89.5953757	0.50605061	119.5911442	7.9103266	34.14102894
56	91.0404624	1.01159215	81.19753843	15.56329263	-4.17950716
57	92.4855491	1.25098003	10.55302184	18.94750878	-74.75096916
58	93.9306358	0.82185332	-59.69876771	12.25768635	-144.9297194
59	95.3757225	0.44174642	-46.4323523	6.48937967	-131.5902803
60	96.8208092	1.19415384	-89.60383314	17.28250899	-174.6887531
61	98.265896	1.44775217	191.7623403	20.646886	106.7504123
62	99.7109827	0.85784717	114.1809963	12.05809533	29.24204413
63	102.6011561	1.26065598	97.77325559	17.22485135	12.98020533
64	104.0462428	1.46182669	13.53075675	19.69841858	-71.18936781
65	105.4913295	0.80904836	-72.5357192	10.75402442	-157.1829352
66	108.3815029	1.20076009	-74.4187396	15.53886592	-158.9201909
67	109.8265896	1.33605676	195.6640681	17.06432716	111.2354725
68	111.2716763	0.67082263	99.19536801	8.45763702	14.83961008
69	114.1618497	1.07115102	115.4087964	13.1663738	31.1986586
70	115.6069364	1.08374939	18.42418324	13.15642028	-65.71317246
71	117.0520231	0.50870668	267.2316139	6.10011844	-176.8329788
72	118.4971098	0.47054228	62.77343177	5.57440251	-21.21841697
73	119.9421965	0.88404218	-51.95239124	10.34824708	-135.8715155
74	121.3872832	0.76784077	204.1776707	8.88224687	120.3312512
75	124.2774566	0.55462314	255.7637608	6.26831321	172.062691
76	125.7225434	0.70787957	147.3538415	7.90956162	63.72541611
77	127.1676301	0.43410493	37.30547349	4.79607711	-46.25032805
78	130.0578035	0.60623465	86.57158083	6.55085623	3.16096445
79	131.5028902	0.59629581	-6.89719356	6.37358929	-90.23524911
80	135.8381503	0.61014959	-85.08578573	6.31637577	-168.2062884
81	137.283237	0.58444991	202.6709715	5.98755906	119.6229425
82	141.6184971	0.55240486	105.0563298	5.48859935	22.22558675
83	143.0635838	0.64531799	46.00237732	6.34801664	-36.75598277
84	144.5086705	0.55339844	-10.67374661	5.39023197	-93.35974699
85	147.3988439	0.4663892	-61.76997336	4.4551258	-144.3113249
86	148.8439306	0.70074758	243.9189594	6.62991755	161.4498965
87	150.2890173	0.69224224	175.5979624	6.48755822	93.20116418

88	154.6242775	0.74610153	78.05051895	6.7997513	-4.12963234
89	156.0693642	0.74624741	-1.50570826	6.73927894	-83.61369356
90	160.4046243	0.73935408	-88.77208632	6.50001443	-170.6637257
91	161.849711	0.7143387	181.2175322	6.22514046	99.39795682
92	166.1849711	0.70508902	105.851555	5.98752942	24.24801428
93	167.6300578	0.59801676	3.32024543	5.03544404	-78.21133685
94	170.5202312	0.50401169	51.05705502	4.17354149	-30.33069126
95	171.9653179	0.65307439	-57.87923757	5.3634556	-139.1951067
96	173.4104046	0.42562871	188.2588801	3.46706672	107.0148605
97	176.300578	0.64086668	243.5030533	5.13676212	162.4026495
98	177.7456647	0.6176973	142.4130451	4.91176651	61.38440703
99	180.6358382	0.42781745	170.188494	3.34879571	89.30330203
100	182.0809249	0.75111872	72.0011172	5.8339907	-8.81239478
101	183.5260116	0.62298643	-16.93103674	4.80165263	-97.67289772
102	186.416185	0.51226261	-21.45769458	3.88863485	-102.0563414
103	187.8612717	0.82282784	257.9874823	6.1994049	177.4603983
104	189.3063584	0.66344334	182.7285181	4.96143996	102.2729671
105	192.1965318	0.56937552	149.2735988	4.19571478	68.96102338
106	193.6416185	0.83274178	83.82403307	6.09196154	3.58289999
107	195.0867052	0.73554083	18.34545843	5.34217435	-61.82426299
108	196.5317919	0.47169162	-20.3303713	3.40140536	-100.4287119
109	197.9768786	0.57875538	-38.87351095	4.1438914	-118.9005017
110	199.4219653	0.80388948	269.4822032	5.715399	-170.4734691
111	200.867052	0.79741716	210.5084814	5.62984098	130.6240963
112	202.3121387	0.63050958	161.4801941	4.42064572	81.66706452
113	203.7572254	0.54872701	133.3196409	3.82082053	53.577735
114	205.2023121	0.71900838	96.15128222	4.97236529	16.48056794
115	206.6473988	0.84536517	40.46755148	5.80663308	-39.13200339
116	208.0924855	0.73356809	-18.41331511	5.00487586	-97.941743
117	209.5375723	0.48908288	-56.57992419	3.31458969	-136.0372577
118	210.982659	0.60670328	-74.55728222	4.08450465	-153.9435542
119	212.4277457	0.86054818	228.7639063	5.75539319	149.4486628
120	213.8728324	0.78620093	160.884903	5.22385194	81.64065481
121	215.3179191	0.395978	111.0637197	2.61400451	31.89043341
122	216.7630058	0.48792682	119.6048194	3.20028118	40.50246143
123	218.2080925	0.84569845	56.91325321	5.51146554	-22.11821026
124	219.6531792	0.78315461	-20.68252902	5.07150517	-99.64313196
125	222.5433526	0.39661494	-38.37498919	2.53625024	-117.1939738
126	223.9884393	0.79905054	244.7534842	5.07799957	166.005257
127	225.433526	0.72764979	157.7117681	4.59573428	79.0342635
128	229.7687861	0.72879792	73.80696629	4.51951551	-4.65858068
129	231.2138728	0.63212541	-24.81872812	3.89649993	-103.2136933
130	234.1040462	0.43618635	14.25570644	2.6568645	-63.99820251
131	235.5491329	0.65094698	264.1580215	3.94168375	-174.0254134
132	236.9942197	0.50032936	152.6138516	3.01195132	74.50085464

133	239.8843931	0.52305193	209.6650153	3.11242214	131.6927846
134	241.3294798	0.56813076	96.66944978	3.36130196	18.76754709
135	245.6647399	0.59374309	38.8426977	3.45359054	-38.84844361
136	247.1098266	0.50590646	-68.93479474	2.926252	-146.5557571
137	250	0.42145188	-31.61639869	2.41087216	-109.0971164
138	251.4450867	0.63589321	225.5219577	3.61764124	148.1113052
139	252.8901734	0.46073639	127.5514396	2.60689721	50.21081421
140	255.7803468	0.47272612	141.0111736	2.64597288	63.8104869
141	257.2254335	0.64550594	49.39924902	3.59376788	-27.73152649
142	258.6705202	0.42966733	-35.34295467	2.37941626	-112.4038579
143	261.5606936	0.45935633	-46.46055273	2.5171365	-123.381829
144	263.0057803	0.60040679	233.1404285	3.2729021	156.2889066
145	264.4508671	0.41867426	158.4368855	2.27042813	81.65507836
146	267.3410405	0.40689229	125.7096677	2.18393495	49.06717031
147	268.7861272	0.52587992	56.66310579	2.80822052	-19.90979691
148	270.2312139	0.40360627	-8.2725	2.14437169	-84.77584832
149	274.566474	0.40976517	241.0302746	2.14460554	164.7353457

Tabla 86: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente del encendedor comercial amplificada por 10.

Armónico	Frecuencia	Módulo medido	fase medida (°)	Módulo real	Fase real(°)
1	1.4450867	5.1015387	-27.64148667	4928.592588	-117.5679468
2	4.3352601	8.18159379	53.98485983	2634.761171	-35.79452161
3	5.7803468	12.766853	-18.80542832	3083.549798	-108.5112714
4	7.2254335	11.92470316	-83.98422731	2304.134847	-173.6165329
5	10.1156069	15.94774745	258.3538749	2201.10223	168.8686402
6	11.5606936	24.63694148	182.8400057	2975.370651	93.42830409
7	13.0057803	19.28306137	102.8330522	2070.064247	13.49488171
8	14.4508671	6.30969689	95.52096543	609.6290308	6.2563239
9	15.8959538	22.85746678	81.28571795	2007.705768	-7.90539706
10	17.3410405	33.86807161	1.5775474	2726.98095	-87.54004376
11	18.7861272	25.1875785	-76.32733207	1872.082082	-165.3714023
12	20.2312139	7.13722151	-82.49008493	492.5979701	-171.4606373
13	21.6763006	29.45514662	262.0871885	1897.456282	173.1901505
14	23.1213873	41.2452188	183.018207	2490.958907	94.19467978
15	24.566474	30.21807292	103.8852056	1717.681259	15.13518525
16	26.0115607	8.10213763	103.3947624	434.9750626	14.7182449
17	27.4566474	33.01599958	83.7518882	1679.273081	-4.85113089
18	28.9017341	45.75914321	3.97276774	2211.119976	-84.55675751
19	30.3468208	31.87265734	-76.22054385	1466.824163	-164.6765801
20	31.7919075	8.02366885	-74.37970444	352.4883458	-162.7622568
21	33.2369942	34.92446934	265.4033929	1467.616249	177.0943192
22	34.6820809	47.09534191	183.9218108	1896.679901	95.68621012
23	36.1271676	32.34746756	103.5170228	1250.676871	15.35488931
24	37.5722543	7.11255964	111.6962678	264.432992	23.60759544
25	39.017341	34.91780607	86.64046746	1250.158817	-1.37474996
26	40.4624277	45.87060839	4.83286922	1583.718986	-83.10889983
27	41.9075145	30.62349352	-77.83701721	1020.889536	-165.7053447
28	43.3526012	5.84095168	-59.45058542	188.2371988	-147.2454783
29	44.7976879	32.24155927	268.901191	1005.586013	-178.8202745
30	46.2427746	42.47199656	184.8101316	1283.335121	97.16208597
31	47.6878613	27.3456471	100.4575758	801.2810243	12.88294232
32	49.132948	5.21869402	115.6403949	148.4285463	28.1391655
33	50.5780347	27.22935081	89.06522252	752.3646721	1.63738913
34	52.0231214	36.36819782	5.44694781	977.0207288	-81.90749807
35	53.4682081	23.10288461	-82.02873755	603.9139201	-169.3098046
36	56.3583815	23.61183645	-84.87597387	585.6389595	-172.0103103
37	57.8034682	29.18558218	186.2172791	705.8320242	99.15629398
38	59.2485549	17.44659983	94.82132904	411.6696313	7.83368565
39	62.1387283	17.59265418	100.7345917	395.8628271	13.89360186
40	63.583815	20.6626403	6.59075971	454.4080082	-80.17691883
41	65.0289017	12.21192107	268.427641	262.6128947	-178.2667368
42	67.9190751	11.34043214	-70.26548807	233.5295872	-156.8132971

43	69.3641618	12.23659337	188.2120263	246.7534963	101.7374848
44	70.8092486	7.1183971	72.8812141	140.6257076	-13.52007138
45	72.2543353	4.56180107	267.8433462	88.32429924	-178.4846951
46	73.699422	5.8026772	135.487789	110.1559797	49.23297995
47	75.1445087	4.07860033	9.21723519	75.94415144	-76.96435391
48	78.0346821	5.32297279	99.98047709	95.46023587	13.94529019
49	79.4797688	4.04671848	24.32003203	71.25922957	-61.64197309
50	82.3699422	4.56987228	-26.81261515	77.66221015	-112.6282965
51	83.8150289	5.45780071	-71.73300686	91.16143123	-157.4755467
52	85.2601156	7.14774648	247.217968	117.3762427	161.5485557
53	86.7052023	8.5657182	188.6657715	138.3304947	103.0694727
54	88.150289	6.8302872	130.7741392	108.5069494	45.2509395
55	89.5953757	5.03486796	119.5911442	78.70250362	34.14102894
56	91.0404624	10.06467108	81.19753843	154.8444412	-4.17950716
57	92.4855491	12.44642174	10.55302184	188.5151478	-74.75096916
58	93.9306358	8.17689559	-59.69876771	121.9558515	-144.9297194
59	95.3757225	4.39508394	-46.4323523	64.56502435	-131.5902803
60	96.8208092	11.88103886	-89.60383314	171.9495044	-174.6887531
61	98.265896	14.40417407	191.7623403	205.4228245	106.7504123
62	99.7109827	8.53501046	114.1809963	119.9700522	29.24204413
63	102.6011561	12.54269101	97.77325559	171.3758485	12.98020533
64	104.0462428	14.54420619	13.53075675	195.9862024	-71.18936781
65	105.4913295	8.04949471	-72.5357192	106.9954121	-157.1829352
66	108.3815029	11.9467667	-74.4187396	154.6014124	-158.9201909
67	109.8265896	13.29287885	195.6640681	169.7787403	111.2354725
68	111.2716763	6.6742403	99.19536801	84.14787949	14.83961008
69	114.1618497	10.65724235	115.4087964	130.9966885	31.1986586
70	115.6069364	10.78258779	18.42418324	130.8976577	-65.71317246
71	117.0520231	5.06129418	267.2316139	60.6921339	-176.8329788
72	118.4971098	4.68158366	62.77343177	55.46160845	-21.21841697
73	119.9421965	8.79563345	-51.95239124	102.9581961	-135.8715155
74	121.3872832	7.63950651	204.1776707	88.37246658	120.3312512
75	124.2774566	5.51813247	255.7637608	62.3655599	172.062691
76	125.7225434	7.04293228	147.3538415	78.6948928	63.72541611
77	127.1676301	4.31905615	37.30547349	47.71778643	-46.25032805
78	130.0578035	6.03163279	86.57158083	65.17667579	3.16096445
79	131.5028902	5.93274787	-6.89719356	63.41298677	-90.23524911
80	135.8381503	6.07058379	-85.08578573	62.84375014	-168.2062884
81	137.283237	5.81488901	202.6709715	59.57224185	119.6229425
82	141.6184971	5.49606203	105.0563298	54.60792379	22.22558675
83	143.0635838	6.42048605	46.00237732	63.15855584	-36.75598277
84	144.5086705	5.50594755	-10.67374661	53.6292341	-93.35974699
85	147.3988439	4.64026323	-61.76997336	44.32554709	-144.3113249
86	148.8439306	6.97197378	243.9189594	65.96328355	161.4498965
87	150.2890173	6.88735129	175.5979624	64.54690264	93.20116418

88	154.6242775	7.42321545	78.05051895	67.65301624	-4.12963234
89	156.0693642	7.42466686	-1.50570826	67.05135635	-83.61369356
90	160.4046243	7.35608286	-88.77208632	64.67083372	-170.6637257
91	161.849711	7.10719643	181.2175322	61.93602007	99.39795682
92	166.1849711	7.01516821	105.851555	59.57194746	24.24801428
93	167.6300578	5.94987024	3.32024543	50.09932941	-78.21133685
94	170.5202312	5.01458214	51.05705502	41.52397061	-30.33069126
95	171.9653179	6.49765716	-57.87923757	53.36282698	-139.1951067
96	173.4104046	4.23472346	188.2588801	34.49501505	107.0148605
97	176.300578	6.37619849	243.5030533	51.10737681	162.4026495
98	177.7456647	6.14567852	142.4130451	48.86881966	61.38440703
99	180.6358382	4.25649995	170.188494	33.31829675	89.30330203
100	182.0809249	7.47313323	72.0011172	58.0443392	-8.81239478
101	183.5260116	6.19830187	-16.93103674	47.77325966	-97.67289772
102	186.416185	5.09667329	-21.45769458	38.6893382	-102.0563414
103	187.8612717	8.18659135	257.9874823	61.67996764	177.4603983
104	189.3063584	6.6008213	182.7285181	49.36303759	102.2729671
105	192.1965318	5.66490887	149.2735988	41.74457983	68.96102338
106	193.6416185	8.28522849	83.82403307	60.61097751	3.58289999
107	195.0867052	7.31814355	18.34545843	53.15109263	-61.82426299
108	196.5317919	4.69301884	-20.3303713	33.84172787	-100.4287119
109	197.9768786	5.75823228	-38.87351095	41.22897179	-118.9005017
110	199.4219653	7.99816721	269.4822032	56.86442976	-170.4734691
111	200.867052	7.93377193	210.5084814	56.01318431	130.6240963
112	202.3121387	6.2731522	161.4801941	43.98249341	81.66706452
113	203.7572254	5.45946985	133.3196409	38.01463042	53.577735
114	205.2023121	7.15365662	96.15128222	49.47173752	16.48056794
115	206.6473988	8.41082291	40.46755148	57.77214897	-39.13200339
116	208.0924855	7.29851606	-18.41331511	49.79519605	-97.941743
117	209.5375723	4.86605031	-56.57992419	32.97796926	-136.0372577
118	210.982659	6.03629532	-74.55728222	40.63811273	-153.9435542
119	212.4277457	8.56188375	228.7639063	57.26234575	149.4486628
120	213.8728324	7.82217794	160.884903	51.97386299	81.64065481
121	215.3179191	3.93971852	111.0637197	26.00761145	31.89043341
122	216.7630058	4.85454829	119.6048194	31.84067544	40.50246143
123	218.2080925	8.41413883	56.91325321	54.83542765	-22.11821026
124	219.6531792	7.79186904	-20.68252902	50.45811337	-99.64313196
125	222.5433526	3.94605566	-38.37498919	25.23400811	-117.1939738
126	223.9884393	7.95002299	244.7534842	50.52272828	166.005257
127	225.433526	7.23963295	157.7117681	45.72450894	79.0342635
128	229.7687861	7.25105601	73.80696629	44.9661823	-4.65858068
129	231.2138728	6.28922866	-24.81872812	38.76759046	-103.2136933
130	234.1040462	4.33976494	14.25570644	26.43403995	-63.99820251
131	235.5491329	6.47649083	264.1580215	39.21713972	-174.0254134
132	236.9942197	4.9779454	152.6138516	29.96691864	74.50085464

133	239.8843931	5.20401985	209.6650153	30.9665363	131.6927846
134	241.3294798	5.65252437	96.66944978	33.4427258	18.76754709
135	245.6647399	5.90735005	38.8426977	34.36093587	-38.84844361
136	247.1098266	5.03343377	-68.93479474	29.11426682	-146.5557571
137	250	4.19316672	-31.61639869	23.98657923	-109.0971164
138	251.4450867	6.32671581	225.5219577	35.99313169	148.1113052
139	252.8901734	4.5840216	127.5514396	25.9368988	50.21081421
140	255.7803468	4.70331139	141.0111736	26.32567534	63.8104869
141	257.2254335	6.42235607	49.39924902	35.75560742	-27.73152649
142	258.6705202	4.274905	-35.34295467	23.67361387	-112.4038579
143	261.5606936	4.57029086	-46.46055273	25.04383892	-123.381829
144	263.0057803	5.97364947	233.1404285	32.56320587	156.2889066
145	264.4508671	4.16553131	158.4368855	22.58925463	81.65507836
146	267.3410405	4.04830843	125.7096677	21.72870439	49.06717031
147	268.7861272	5.23215654	56.66310579	27.93993232	-19.90979691
148	270.2312139	4.01561475	-8.2725	21.33507632	-84.77584832
149	274.566474	4.07689168	241.0302746	21.3374028	164.7353457

Tabla 87: Coeficientes de Fourier y generador real de la señal proveniente del encendedor comercial utilizado en los circuitos prácticos.

Armónico	Frecuencia	Módulo medido	fase medida (°)	Módulo real	Fase real(°)
1	1.44092219	7.39875596	-7.38387386	1634.456967	-97.10376082
2	2.88184438	2.2367374	5.06075152	247.0673525	-84.37903579
3	4.32276657	14.01342345	-86.71885823	1031.999044	-175.8785727
4	5.76368876	28.0008378	129.1416982	1546.69136	40.26201644
5	7.20461095	26.40098261	-15.00933589	1166.781139	-103.6090384
6	8.64553314	1.19583176	207.5960078	44.04688452	119.2762176
7	10.08645533	30.07154468	232.6009059	949.5579298	144.5609479
8	11.52737752	48.83812788	86.42820922	1349.616989	-1.3320102
9	12.96829971	39.97589127	-58.60508366	982.1667823	-146.0856713
10	14.4092219	4.20042077	157.199867	92.90108675	69.99879122
11	15.85014409	37.44255624	186.957713	753.0251982	100.0360157
12	17.29106628	59.35689839	40.89819777	1094.575326	-45.74426744
13	18.73198847	46.10698905	255.8820414	785.0699996	169.5186487
14	20.17291066	6.36511122	113.6115258	100.6705542	27.52703284
15	21.61383285	36.09694124	142.4848991	533.0321486	56.67912026
16	23.05475504	56.15801465	-2.92237461	777.7248918	-88.44963803
17	24.49567723	42.27855306	211.5869387	551.2842664	126.3379791
18	25.93659942	6.74239808	69.37180091	83.0666362	-15.59907953
19	27.37752161	27.93798291	98.9840957	326.2245666	14.29105715
20	28.8184438	42.13206066	-44.92151539	467.5827861	-129.3369621
21	30.25936599	30.59596089	170.3362347	323.5424663	86.19811706
22	31.70028818	5.25560029	27.95235887	53.0770619	-55.9087051
23	33.14121037	16.43914436	60.96881109	158.8873658	-22.61548705
24	34.58213256	22.68525479	-79.46809703	210.2379777	-162.7759297
25	36.02305476	14.92677374	141.459784	132.8787128	58.42810417
26	37.46397695	2.46623613	11.39161062	21.12279705	-71.36424141
27	38.90489914	6.32553247	54.56685034	52.20282191	-27.91351103
28	40.34582133	9.15847478	-59.73408497	72.92999234	-141.9393049
29	41.78674352	8.82278844	184.2682566	67.87957546	102.3378168
30	43.22766571	3.32067624	62.42547545	24.71362825	-19.23055737
31	44.6685879	8.03042	92.36990805	57.87853216	10.98789725
32	46.10951009	18.01785171	-43.30446331	125.8964189	-124.4128488
33	47.55043228	18.53216434	176.256835	125.6613156	95.42166669
34	48.99135447	6.84211853	38.63441864	45.065037	-41.92795233
35	50.43227666	12.15590893	63.15335995	77.838716	-17.13664477
36	51.87319885	25.58734487	-77.59811924	159.425107	-157.6162001
37	53.31412104	24.17630832	138.8284077	146.6862634	59.08179728
38	54.75504323	8.52946119	-2.20346803	50.43311446	-81.67907267
39	56.19596542	12.36323515	24.45606512	71.29043716	-54.74900913
40	57.63688761	25.19551185	241.42182	141.7823696	162.4867899
41	59.0778098	22.83326196	96.69923493	125.4722487	18.03375215
42	60.51873199	7.97627808	-44.36335763	42.82805247	-122.7598005

43	61.95965418	9.41347288	-18.03634426	49.41760059	-96.16426508
44	63.40057637	18.62774833	199.7927884	95.6621032	121.9328616
45	64.84149856	16.05211807	55.78665523	80.6850588	-21.80581576
46	66.28242075	5.36099158	-84.57086011	26.38825162	-161.8964235
47	67.72334294	5.10861421	-57.17277357	24.63698376	-134.2319874
48	69.16426513	9.21221066	163.9398116	43.54845444	87.14637947
49	70.60518732	7.03495455	26.77477612	32.61309277	-49.75345165
50	72.04610951	2.07275676	259.0549828	9.42736895	-177.2086274
51	73.4870317	1.46652243	-55.32667555	6.54673541	-131.3262644
52	74.92795389	3.08476219	200.7747803	13.52157619	125.0386075
53	76.36887608	4.18723863	83.09830219	18.02901911	7.62493116
54	77.80979827	2.53864713	-46.7551481	10.7410966	-121.9663406
55	79.25072046	2.37647697	-15.56319996	9.88414688	-90.51284575
56	80.69164265	7.34043651	205.9523741	30.02193847	131.2636345
57	82.13256484	8.76310296	63.57494145	35.25598401	-10.85354093
58	83.57348703	4.49086665	-77.10029893	17.77890883	-151.2691813
59	85.01440922	3.3486141	-53.91262146	13.04900386	-127.8225691
60	86.45533141	9.36892608	164.1693974	35.94779656	90.51771113
61	87.8962536	9.85286945	19.26521183	37.23437714	-54.12889419
62	89.33717579	4.58475263	237.4314438	17.06950319	164.2942292
63	90.77809798	2.89483125	252.3939856	10.62117914	179.512966
64	92.21902017	7.88599011	111.4347878	28.52118021	38.80925957
65	93.65994236	7.7208809	-34.75231477	27.53301117	-107.1230626
66	95.10086455	3.17198849	182.6383599	11.15589856	110.5216744
67	96.54178674	2.18465118	187.1945835	7.57963848	115.3312354
68	97.98270893	5.07811222	45.2166223	17.38466928	-26.39412011
69	99.42363112	4.49686977	254.0220583	15.19405237	-177.3368168
70	100.8645533	1.55896859	97.74758902	5.19994185	26.6398366
71	102.3054755	1.66329853	117.1362828	5.47803904	46.2789019
72	103.7463977	3.48564666	-42.44790879	11.33771434	-113.0556754
73	105.1873199	3.34075469	153.8620616	10.73408303	83.50314605
74	106.6282421	1.65494733	-15.01753921	5.25377399	-85.12837279
75	108.0691643	1.36941635	49.87168932	4.29611533	-19.99183709
76	109.5100865	3.53370335	240.9852607	10.95741027	171.3682611
77	110.9510087	3.77642261	83.11845583	11.57651769	13.74719738
78	112.3919308	1.9199439	-77.57551619	5.81949763	-146.7018245
79	113.832853	0.95008223	6.03300843	2.84797327	-62.84914584
80	115.2737752	2.47301943	190.9418352	7.332571	122.3030339
81	116.7146974	2.55467151	39.8208481	7.49363142	-28.57540594
82	118.1556196	1.13784514	249.9559131	3.30249125	-178.1986042
83	121.037464	1.21783356	203.1384871	3.4622667	135.4649939
84	122.4783862	1.64216841	85.08415925	4.62168031	17.64994485
85	123.9193084	1.25874664	-42.55354263	3.5074906	-109.7493059
86	126.8011527	3.01091371	223.9913572	8.22814123	157.2699978
87	128.2420749	4.56691626	79.71679139	12.36211965	13.23137724

88	129.6829971	3.32424639	-66.8560536	8.91436364	-133.106365
89	132.5648415	5.08647646	190.730013	13.39201457	124.9473661
90	134.0057637	7.06916682	43.78429148	18.44586978	-21.76579989
91	135.4466859	4.80015243	255.8628014	12.4149176	-169.4555896
92	138.3285303	6.04239968	152.3236994	15.35950336	87.46613233
93	139.7694525	7.93747465	4.74100554	20.00639825	-59.8874432
94	141.2103746	5.02827301	217.1669969	12.5682776	152.7668008
95	144.092219	5.47789621	117.9082335	13.46982596	53.96193659
96	145.5331412	6.69320289	-28.91231909	16.32680298	-92.6329738
97	146.9740634	3.92783965	184.170243	9.50577518	120.6743564
98	149.8559078	3.86380105	89.99051381	9.207064	26.94153366
99	151.29683	4.43188513	-48.22338165	10.48091405	-111.0502266
100	152.7377522	2.41304834	178.1062247	5.66402453	115.5006342
101	155.6195965	2.65519653	89.78037864	6.14160642	27.61464996
102	157.0605187	3.77909783	-35.12479311	8.67859959	-97.07191685
103	158.5014409	3.03402569	195.4625412	6.91827851	133.7331371
104	161.3832853	3.38582172	90.89630187	7.61373406	29.59967755
105	162.8242075	5.70576011	-44.98158683	12.74334011	-106.0631524
106	164.2651297	4.80370675	173.9927115	10.65664869	113.1253165
107	167.1469741	4.18998411	65.78162727	9.17312766	5.33990706
108	168.5878963	6.81439882	-77.52695965	14.82237636	-137.7571763
109	170.0288184	5.44979067	137.5921911	11.77852828	77.57258871
110	171.4697406	0.86776717	-12.39260487	1.86367609	-72.20248261
111	172.9106628	4.16158155	30.88257509	8.88210983	-28.71846741
112	174.351585	6.27757003	245.6113497	13.31599843	-173.7817469
113	175.7925072	4.57661898	99.76055063	9.64905393	40.5745109
114	178.6743516	3.03057305	-2.4998394	6.31361746	-61.27443136
115	180.1152738	4.11695038	212.7842353	8.52675536	154.2140352
116	181.556196	2.61038393	70.93441738	5.37524748	12.56772179
117	184.4380404	1.63011306	-21.36686111	3.31875619	-79.32920677
118	185.8789625	1.96399186	214.4926214	3.97625267	156.7311227
119	187.3198847	1.51360144	100.1427884	3.04755664	42.58125253
120	190.2017291	1.23419843	-4.34266778	2.45823409	-61.50692641
121	191.6426513	2.76761485	233.428864	5.48321198	176.4619219
122	193.0835735	2.97342152	96.23551606	5.86009301	39.4650109
123	194.5244957	1.14792675	-38.16965488	2.25064989	-94.74460165
124	195.9654179	1.77205338	-14.55923462	3.45655104	-70.9395001
125	197.4063401	3.81910651	203.6986563	7.41184994	147.5121964
126	198.8472623	3.70842148	57.46458648	7.1610792	1.47105799
127	200.2881844	1.26520556	269.2517728	2.43108699	-146.5496969
128	201.7291066	1.89645111	-52.85230217	3.62623686	-108.4625842
129	203.1700288	3.68458836	158.370814	7.01137699	102.9508504
130	204.610951	3.17666376	9.87431958	6.01602688	-45.35619321
131	206.0518732	0.90801582	210.0707632	1.71151259	155.0288354
132	207.4927954	1.47144417	264.4849242	2.76059227	-150.3692825

133	208.9337176	2.42713464	105.9103804	4.53260036	51.24303284
134	210.3746398	1.7339954	-51.47572407	3.22343952	-105.9570726
135	213.2564842	0.83572154	211.6833681	1.53970221	157.5714458
136	214.6974063	0.96157706	29.27407845	1.76377874	-24.65441252
137	220.4610951	1.0325141	252.6475355	1.8616963	-160.5557234
138	221.9020173	1.58108579	86.60437353	2.83895373	33.58031088
139	223.3429395	1.15133914	-71.96833454	2.05881026	-124.8140409
140	226.2247839	1.5279174	181.9183595	2.71014539	129.4268556
141	227.6657061	1.89640763	25.20302581	3.35037436	-27.11262679
142	229.1066282	1.08624533	225.5637436	1.91151421	173.4231124
143	231.9884726	1.19229628	119.1737762	2.08192844	67.38070875
144	233.4293948	1.38969309	-41.11312888	2.417375	-92.73364872
145	239.1930836	0.89851654	212.9265402	1.53993694	161.9880467
146	243.5158501	1.13176629	-84.52549625	1.91901018	-134.9609635
147	244.9567723	1.67030486	120.507727	2.82226113	70.23833276
148	246.3976945	1.1679735	-30.36630979	1.9666701	-80.47042739
149	249.2795389	1.75525776	212.7826468	2.93549385	163.0067056
150	250.7204611	2.35735999	63.9863082	3.92925697	14.37327275
151	252.1613833	1.46366651	-86.40993801	2.43156689	-135.860852
152	255.0432277	1.92678237	165.564262	3.18010162	116.4352507
153	256.4841499	2.30570265	16.68516752	3.79328896	-32.28405645
154	257.9250721	1.27750394	225.678919	2.09504663	176.8687105
155	260.8069164	1.59927994	125.1219412	2.60637192	76.62746081
156	262.2478386	1.58155082	-23.55142899	2.56954553	-71.88919043
157	273.7752161	1.23382262	31.11768443	1.95793252	-15.99338367
158	275.2161383	1.14012328	262.6099094	1.80416384	-144.3511556
159	278.0979827	1.30389993	131.3455828	2.05193435	84.68233788
160	279.5389049	2.19401667	-3.72060754	3.44329861	-50.23602898
161	280.9798271	1.75785374	217.3467984	2.751344	170.9784805
162	283.8616715	1.6733653	94.85321836	2.60520916	48.77696114
163	285.3025937	2.51977908	-44.42682427	3.91269779	-90.35811776
164	286.7435159	1.83747228	172.9889298	2.84582302	127.2018934
165	289.6253602	1.51907923	51.53061155	2.34070795	6.02998292
166	291.0662824	2.02391733	-88.49500756	3.11075466	-133.8534789
167	292.5072046	1.29490528	128.7363943	1.98530798	83.51938706
168	295.389049	0.95665357	11.72615935	1.45951977	-33.20998612
169	296.8299712	0.92647554	228.5389569	1.41005966	-176.2577841
170	308.3573487	1.33795713	-44.73767761	1.99888901	-88.4433773
171	309.7982709	1.52577156	168.0595359	2.27442558	124.4872422
172	314.1210375	1.79103804	-89.08646459	2.65245908	-132.2624258
173	315.5619597	1.75905307	122.6738097	2.59952807	79.62867518
174	319.8847262	1.46208717	229.0178889	2.14711767	-173.6385717
175	321.3256484	1.34098187	78.80982512	1.96522133	36.28166466
176	337.1757925	1.28502108	262.0592803	1.84328883	-139.0980057
177	338.6167147	1.46829224	114.3717682	2.10230352	73.33551595

178	342.9394813	1.64440356	220.5291979	2.34171372	179.8525517
179	344.3804035	1.72818601	70.80896964	2.4566549	30.25103756
180	348.70317	1.4640352	179.6507917	2.07029031	139.4455822
181	350.1440922	1.38002989	27.85455233	1.94815604	-12.23421244
182	365.9942363	1.01910457	203.4272033	1.41314216	164.5830692
183	367.4351585	1.21674798	57.63989392	1.68460482	18.90569019
184	371.7579251	1.45829493	165.4372097	2.00987112	127.0296686
185	373.1988473	1.55286917	17.67139087	2.13703104	-20.62829579
186	377.5216138	1.43792775	124.3919859	1.97017788	86.41280376
187	378.962536	1.37796491	-23.99768008	1.88530445	-61.87103746
188	383.2853026	1.03258496	89.98301133	1.40677836	52.42413815
189	402.0172911	1.03519309	-46.73710599	1.38627702	-82.98340777
190	406.3400576	0.90712557	48.90077773	1.21027357	12.94620589
191	407.7809798	1.03411446	-89.58572695	1.37802155	-125.4439565